


# В НАУКЕ И ПРАКТИКЕ

ГИЗЛЕГПРОМ • МОСКВА • 1934





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
МОСКВА
1934

С. Е. ШЕППАРД • А. Е. КОНРАДИ
ЧАРЛЬЗ ДАВИДСОН • Г. МУСС
ДЖОН ГЕНРИ МОНАЙПЕННИ • ГСОРД РОДМЕН
Г. С. Л. УИНТЕРБОДЕМ • Ф. ЛОУС
В. УАСТЕЛ • ВИЛЬЯМ ХИСЛОП

# ФОТОГРАФИЯ

## В НАУКЕ И ПРАКТИКЕ

Перевод
С. Г. ГУРЕВИЧА
Под общей редакцией и с предисловием
К. В. ЧИБИСОВА

Редактор А. Цветкова
Оформление книги художника-полиграфиста Н. Седельникова
13-я типо-цинкография Мособлполиграфа, Москва, Петровка, 17

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Фотография имеет в настоящее время исключительно широкое применение в различных областях науки и техники. Использование фотографии как мощного вспомогательного орудия исследования и овладения технологическими процессами в различных отраслях производства является особенно важным в условиях социалистического переустройства всей народно-хозяйственной жизни первого в мире рабоче-крестьянского государства.

Однако для правильного применения фотографии и целесообразного использования получаемых результатов требуются более углубленные знания самого фотографического процесса, некоторое понимание физико-химического смысла отдельных операций и наконец знание технических возможностей фотографии и специфических особенностей применения ее в данной области. В мировой литературе эти вопросы освещены сравнительно мало, а в советской литературе в этом отношении существует определенный пробел. Поэтому следует признать весьма ценным выход в свет настоящей книги, представляющей перевод с немецкого издания

коллективного труда крупнейших английских и американских специалистов. Охватываемый этим трудом очень обширный материал распадается по существу на две части: первая часть посвящена вопросам оптики, так как для получения фотографического изображения необходимо иметь действительное оптическое изображение, и вопросам теории фотографических процессов и методов; эта часть книги дает возможность получить углубленные знания, отвечающие современному уровню фотографии; вторая часть книги посвящена применению фотографии в отдельных областях науки и практики.

Выпускаемая книга может быть рекомендована для лиц, применяющих фотографию в своей повседневной работе, а также в качестве пособия для учащихся вузов и втузов, где преподается фотография с тем или иным отраслевым уклоном; первая часть книги, посвященная оптике и теории фотографических процессов, является несомненно ценной для всех, желающих получить углубленные сведения о физико-химической природе фотографического процесса.

К. Чибисов

1 ГЛАВА

# ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

С. Е. ШЕППАРД

Фотографическая оптика подробно будет рассмотрена в следующей главе, здесь же мы даем лишь краткий очерк элементов фотографической оптики.

## Основные законы геометрической оптики

*Закон прямолинейного распространения света.* В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Пучок лучей света есть собрание прямых линий, лучей света геометрически связанных, а физически независимых друг от друга.

*Закон отражения.* Если луч света падает на гладкую поверхность, он частично преломляется, а частично отражается. Падающий и отраженный лучи образуют с перпендикуляром в точке падения (нормально к плоскости) равные углы (рис. 1).

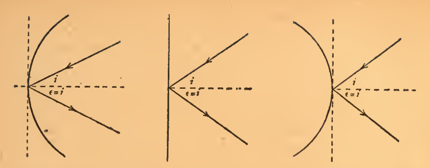
Интенсивность отраженного луча растет с углом отражения; если луч света из оптически более плотной среды переходит в оптически менее плотную среду, то при некотором „критическом“ угле падения наступает полное внутреннее отражение: луч совсем не преломляется, а только отражается. В фотографии полное внутреннее отражение ведет к образованию так называемых „ореолов“ — яркого кольца, окружающего изображение светящейся точки объекта.

Ореолы представляют результат полного внутреннего отражения от задней поверхности подложки светочувствительного слоя.

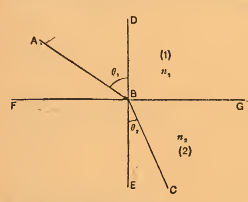
В случае целлулоидной пленки ореолы бывают чрезвычайно малых размеров.

В случае стеклянных пластинок возникновение ореолов предотвращается применением неотражающего, а поглощающего подслоя, наносимого с задней стороны пластинки, или же промежуточного слоя между эмульсией и стеклянной пластинкой.

*Закон преломления.* Если луч света переходит из одной среды в другую, он преломляется, т. е. во второй среде он отклоняется от своего первоначального направления. Оптически более




**1.** Отражение луча света: *i*—угол падения, *e*—угол отражения. Отражение от вогнутой, плоской и выпуклой поверхности




**2**. Преломление луча света

плотной средой будет та, в которой преломившийся луч приближается к перпендикуляру (на поверхности раздела); оптически менее плотной будет среда, в которой преломившийся луч удаляется от перпендикуляра. Отношение синусов угла падения и угла преломления для двух неизменяющихся сред и света одинаковой длины волны есть величина постоянная.

На рис. 2 индекс *1* обозначает среду по одну сторону, а индекс *2* — среду по другую сторону поверхности раздела *FG*, *n* — показатель преломления Θ — угол, образуемый лучом света с перпендикуляром *ED*. Мы имеем:

$$n_1 \sin \Theta_1 = n_2 \sin \Theta_2,$$

т. е.

$$\frac{\sin \Theta_1}{\sin \Theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = K \text{ (константа).}$$

Эта константа называется относительным показателем преломления данной среды по отношению к другой. Если среда, обозначенная индексом *1*, представляет безвоздушное пространство, то $n_1$ можно приравнять к 1 и тогда получим:

$$\frac{\sin \Theta_1}{\sin \Theta_2} = n_2$$ (абсолютный показатель преломления второй среды).

Все прозрачные вещества имеют абсолютный показатель преломления больше единицы.

*Падающий отраженный и преломленный лучи лежат в одной плоскости.* Следует заметить, что все приведенные законы могут быть выведены из теоремы Ферма о кратчайшем пути света. Допу-

стим, что луч света идет из данной точки *A* в какую-нибудь точку *B* и по пути претерпевает ряд отражений и преломлений. Из теоремы. Ферма следует, что время, необходимое лучу света для прохождения пути от *A* до *B*, должно быть минимальным. Можно легко рассчитывать отрезки времени, необходимые лучу для прохождения различными мыслимыми путями (включая соприкосновение с поверхностью раздела) от одной точки до другой; оказывается, действительно путь луча таков, что для его прохождения требуется наикратчайшее время и что этот путь согласуется с ранее приведенными законами; таким образом теорема Ферма рассматривает естественный путь луча.

*Белый свет представляет сумму лучей, окрашенных в различные цвета.* Если пропустить через призму луч света, то он преломится в многоцветный спектр (этот факт был известен уже И. Ньютону); это доказывает, что белый свет составлен из лучей различного цвета, преломляющихся с различной силой.

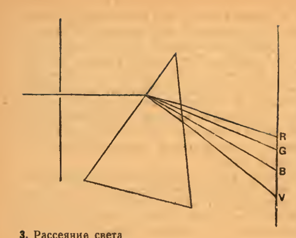
### Физическая оптика

Наряду с изложенными выше основными законами геометрической оптики важна также основная теория физической оптики, а именно в о л н о в а я теория света; с особым вниманием необходимо отнестись к отклонениям от нее, встречающимся при практическом применении оптики. По этой теории свет представляет лучистую энергию, распространяющуюся в форме поперечных колебаний особой среды — эфира. Первоначально принималось, что колебания происходят просто в квазиэластичной среде; из электромагнитной теории Максвелла следует, что колебания состоят в периодической смене электрических и магнитных полей, причем направление силовых линий электрического поля перпендикулярно к направлению линий магнитного поля. Оба направления в свою очередь перпендикулярны к направлению распространения поверхности волны. Колебания с различными периодами (длинами волн) распространяются в вакууме с одинаковой скоростью, равной 300 000 *км/сек*. Если известна скорость *c* и длина волны $\lambda$, то $\lambda = ct$, где *t* означает период колебания. Важнейшим доказательством справедливости волновой теории служит явление интерференции.

Каждую точку волновой поверхности в эфире можно рассматривать как центр новой волновой поверхности или системы волновых поверхностей. При столкновении двух или многих волн в одной точке получается результирующее волновое движение вследствие наложения действий отдельных волн. Если максимумы (или минимумы) волн совпадают, то колебания взаимно усиливаются; если же максимум одной волны совпадает с минимумом другой, то колебания могут прекратиться. Интерференция имеет место также на грани препятствия, поставленного на пути луча света, и вызывает явление так называемой д и ф р а к ц и и (см. также гл. IX «Цветная фотография»).

При элементарном рассмотрении образования изображения в оптических приборах дифракцией можно пренебречь, но при

изображении очень тонких структур она играет весьма существенную роль.



3. Рассеяние света

### Действительное и мнимое изображение

Если расходящиеся из какой-либо точки об'екта лучи собрать в пучок сходящихся лучей, то точка схождения их образует точку изображения первоначальной точки об'екта. Если действительно лучи сходятся в одной точке, т. е. точка схождения лежит в направлении распространения света (считая от точки об'екта), то изображение действительное; если же точка изображения лежит на продолжении лучей в обратном направлении, то изображение мнимое. В фотографии приходится имет дело только с действительными изображениями.

### Линзы и диафрагмы

Если для образования изображения мы пользуемся очень малым отверстием, то изображение так слабо освещено, что практически оно совершенно непригодно. Эта трудность устраняется благодаря применению линзы.

С другой стороны, уменьшая диафрагмой отверстие, можно устранить определенные недостатки изображения, зависящие от линз.

Линза состоит из прозрачной среды, ограниченной поверхностями, имеющими кривизну (одна из поверхностей может быть плоской) с общей нормалью к поверхности. На практике большей частью применяются сферические поверхности.

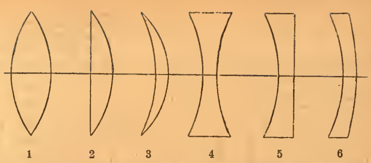
Простые формы линз изображены на рис. 4.

Существуют:

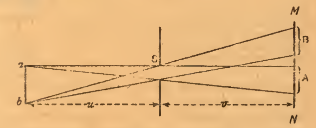
*а) положительные, или собирательные, линзы* — собирают падающие параллельные лучи в действительном (уловимом) фокусе;

*б) отрицательные, или рассеивающие, линзы* — действуют на падающие параллельные лучи таким образом, что последние кажутся расходящимися из точки, лежащей за поверхностью линзы, обращенной к об'екту (мнимый фокус).

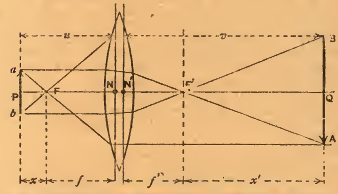
Нормаль, общая для обеих ограничивающих линзу поверхностей, называется осью. В сложной системе линз все нормали к поверхностям должны лежать на общей оси (поэтому система называется центрированной). Практически применяемые фотографические об'ективы в большинстве случаев представляют центрированные, сложные оптические системы.




**4.** Различные формы линз. Три первых формы линз — собирательные (положительные), а последние — три рассеивающие (отрицательные). 1 — двояковыпуклая, 2 — плосковыпуклая, 3 — собирательный мениск, 4 — двояковыгнутая, 5 — плосковогнутая, 6 — рассеивающий мениск




**5.** Образование изображения в камере с малым отверстием

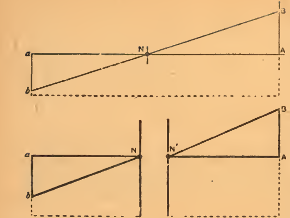



**6.** Образование изображения собирательной линзой

## Образование изображения

На рис. 5 представлено образование изображения с помощью небольшого круглого отверстия.

Каждая точка об'екта (на рисунке точки *a* и *b*) изображается на экране *NM* в виде круглой проекции отверстия. С уменьшением (до определенного предела) размеров этого отверстия резкость изображения возрастает. Если пойти дальше этого предела, наступит явление дифракции, от которого резкость пострадает (гл. III — недостатки камеры с малым отверстием). Полученное



7. Пояснение главных точек: вверху—главные точки совпадают при бесконечно малой толщине линзы; внизу—главные точки в толстой линзе лежат отдельно

изображение окажется обратным, и его масштаб (увеличение) будет выражаться отношением:

$$\frac{AB}{ab}=\frac{v}{n}$$

Если для образования изображения пользоваться простой собирательной линзой (рис. 6), то также получится обратное изображение, но освещенное более ярко, так как при возникновении изображения действие всех лучей, собранных линзой, об'единяется [1]. Каждой плоскости об'екта соответствует плоскость изображения. Это геометрическое соответствие называется коллинеацией.

Лучи, параллельные оси, т. е. идущие от бесконечно отдаленной точки, соединяются собирательной линзой, как упомянуто выше, в одной точке — главном фокусе $F$ (или $F^1$). Расстояние $f$ (или $f^1$) этой точки от определенной точки $N$ (или $N^1$) на оси, характеризующей линзу, называется фокусным расстоянием. При бесконечно малой толщине линзы точки $N$ и $N^1$ совпадают и лежат в точке пересечения линзы с осью. В толстой линзе, какой она практически и делается, эти две точки $N$ и $N^1$, называемые главными (узловыми) точками, или также гауссовскими точками, лежат отдельно.

Луч света, направленный в одну из главных точек (например в точку $N$), после преломления будет казаться выходящим из второй главной точки параллельно первоначальному направлению (рис. 7).

Плоскость, перпендикулярная к оси и проходящая через точку $N$, называется первой главной плоскостью; проходящая же через точку $N^1$ — второй главной плоскостью. В простых собирательных линзах расстоянием между обеими главными точками можно пренебречь, если оно невелико. В сложных системах расстояние это должно учитываться.

В некоторых оптических системах одна из главных точек совпадает с вертикальной осью вращения системы, т. е. осью, вокруг которой вся система может быть повернута. При вращении такой системы изображение остается на месте. Этот конструктивный принцип используется в панорамных камерах.

[1] Сопоставь с применением диафрагмы в целях уменьшения отверстия линзы (см. эту же главу. «Отверстие диафрагмы и глубина фокуса»).

### Фокусное расстояние. Оптическая сила и масштаб изображения

Расстояние узловой точки от главного фокуса линзы называется ф о к у с н ы м  р а с с т о я н и е м линзы. Степень конвергентности (схождения в одну точку), которую претерпевают падающие параллельные лучи, возрастает при уменьшении фокусного расстояния; величину оптической силы — степень конвергентности — можно приближенно выражать также кривизной поверхности выходящей волны. Оптическая сила линзы измеряется обычно обратной величиной длины фокусного расстояния, выраженной в метрах.

Линза с оптической силой (преломляющей силой, равной 1, должна иметь фокусное расстояние, равное 1 *м*.

Увеличение, т. е. отношение величины изображения к величине об'екта, равно отношению расстояния до изображения к расстоянию до об'екта, причем оба расстояния измеряются от поверхностей линзы или, более точно, от первой и второй главных точек. Если задано расстояние до предмета и известно фокусное расстояние линзы, то можно определить как расстояние до изображения, так и масштаб изображения. Если $u$ — расстояние до об'екта (рис. 6), $v$ — соответствующие расстояния изображения и $f$ — фокусное расстояние, то между ними существует следующая зависимость:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}.$$

Если собирательная линза проектирует действительное изображение, то об'ект и изображение находятся вне соответствующих главных фокусов. В том случае, когда впереди и позади линзы одна и та же среда, то $f = f^1$. Если соответствующие расстояния от главных фокусов обозначить через $x$ и $x^1$, то справедливо следующее уравнение:

$$x x' = f^2.$$

Масштаб изображения тогда выразится следующим образом:

$$M = \frac{v}{u} = \frac{v - f}{f} = \frac{x^1}{f} = \frac{f}{x}.$$

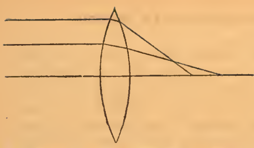
Оба фокуса и обе главные точки называются к а р д и н а л ь н ы м и  т о ч к а м и системы. Остальных характеристических точек, имеющих меньшее значение, мы здесь касаться не будем.

### Фокусное расстояние системы из двух линз

Фокусное расстояние в двухлинзовых системах определяется следующим выражением:

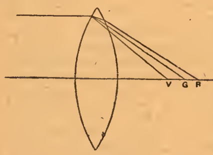
$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d},$$

в котором $f_1$ и $f_2$ — фокусные расстояния линз, составляющих систему, а $d$ — так называемый оптический интервал, т. е. расстояние первой главной точки второй линзы от второй главной точки первой линзы.


8. Сферическая аберрация собирательной линзы

## Ортоскопия и ошибки линз

Точное геометрическое соответствие между об'ектом и изображением обозначают термином ортоскопия. Изображение, даваемое одной простой линзой, страдает различными ошибками. Ниже перечислены условия идеального соответствия между об'ектом и его изображением в том случае, когда получается изображение плоского об'екта, расположенного перпендикулярно к оси:



9. Хроматическая аберрация собирательной линзы

а) точки изображения должны иметь прецизионную (точечную) резкость,

б) поверхность изображения должна быть плоской, т. е. все точки изображения должны лежать в одной плоскости,

в) у об'екта должно быть полное сходство с изображением, т. е. взаимное расположение точек, изображения должно быть правильным.

Обусловленные линзами отклонения изображения от этих условий называются аберрациями. Важнейшие из них следующие: а) сферическая аберрация и кома, б) хроматическая аберрация, в) астигматизм, г) искривление поверхности изображения и д) дисторсия.

*Сферическая аберрация* изображена на рис. 8.

Если мы рассмотрим падающий параллельно оси пучок, то оказывается, что краевые и центральные лучи пересекают ось в разных точках, следовательно не получается резкой точки изображения. Если мы задиафрагмируем систему так, чтобы осталось только небольшое центральное отверстие, то степень сферической аберрации уменьшится, но одновременно уменьшится яркость изображения. Уменьшение этой ошибки при некотором определенном отверстии достигается соответствующим подбором радиусов кривизны поверхностей линзы. Этот вид аберрации у собирательных и рассеивающих линз имеет противоположные знаки, следовательно комбинацией положительных и отрицательных линз ее можно свести до минимума. Сферическая аберрация при косо падающем пучке лучей называется комой; изображение точки, проектирующейся косо падающими на линзу лучами, имеет грушевидную форму.

*Хроматическая аберрация* изображена на рис. 9. Она образуется по той причине, что лучи разного цвета, т. е. разной длины вол-

ны, обладают неодинаковой преломляемостью. Частное от деления разности показателей преломления предполагаемых крайних цветов на показатель преломления лучей среднего участка спектра называется относительным рассеянием (относительной дисперсией).



**10.** Дисторсия. Слева об'ект в форме квадрата; посередине изображение квадрата при бочкообразной, а справа – при подушкообразной дисторсии

У флинтгласа относительное рассеяние больше. чем у кронгласа. Уменьшение хроматической аберрации достигается комбинацией рассеивающей линзы из флинтгласа с собирательной линзой из кронгласа, причем система в целом остается собирательной. Если мы введем коррекцию только в отношении двух цветов, например для желтого ($\lambda = 589\ \mu$) и фиолетового ($\lambda = 434\ \mu$), то для остальных цветов коррекция будет недостаточной; точка изображения будет окружена бледно окрашенным кольцом, которое надо рассматривать, как вторичный спектр. Если мы коррегируем для трех цветов, то как правило необходимо ввести третью линзу — все три линзы соединяются вместе. Системы, исправленные для двух цветов, называются ахроматами, системы же, исправленные для трех цветов, — апохроматами.

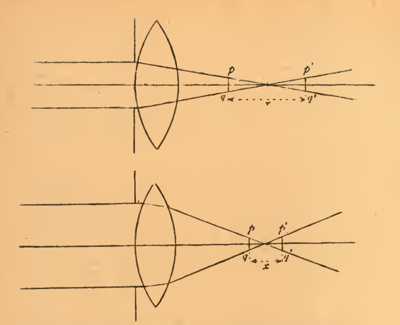
*Астигматизм* внешне выражается в том, что группы линий, лежащие в одной плоскости и взаимно перпендикулярные, изображаются с разной степенью резкости. Так же, как и в случае комы, здесь дело сводится к специфическому случаю сферической аберрации в косых пучках.

*Искривление поверхности изображения.* Этот недостаток означает, что система коррегирована таким образом, что резкие точки изображения действительно лежат на некоторой поверхности изображения, но последняя имеет кривизну. Так как в фотографии необходимо, чтобы поверхность изображения была плоской, упомянутая кривизна должна быть сведена до минимума.

*Дисторсия* изображена на рис. 10. В простой линзе дисторсия связана в основном со сферической аберрацией. Применением правильно расположенной диафрагмы эта ошибка может быть до известной степени уменьшена. Бочкообразная дисторсия получается при положении диафрагмы перед линзой, а подушкообразная — при положении диафрагмы позади линзы. Если диафрагму поместить между двумя линзами, то путем взаимного компенсирования ошибки дисторсии могут быть исключены

## Отверстие диафрагмы (или системы) и глубина фокуса

До сих пор мы указывали только на зависимость, существующую между размером отверстия диафрагмы и сферической аберрацией или, вернее, резкостью изображения. Но не надо забывать, что в фотографии необходимо изображать с достаточной рез-




11. Пояснение глубины фокуса: вверху линза с малым отверстием, внизу—с большим; кружок рассеивания $pq$ или $p'q'$ характеризуется определенной величиной; $x$ измеряет область, в пределах которой диаметр кружка рассеяния не превышает указанной величины

костью на плоскости предметы, имеющие три измерения и отдельные точки которых находятся на разных расстояниях от линзы. Рис. 11 показывает, в каких пределах величина отверстия диафрагмы позволяет повышать глубину фокуса, о которой в данном случае идет речь.

Если мы представим себе, что точка об'екта изображается кружком рассеяния, то диаметр такого кружка не должен превышать определенной величины. Диаметр кружка, равный 0,1 *мм* при рассматривании с расстояния наилучшего зрения (т. е. около 25 *см*), соответствует «большой» резкости. Из приведенного нами рисунка видно, что глубина фокуса возрастает при уменьшении отверстия; длина отрезка $x$ определяет глубину фокуса.

## Зависимость между отверстиями диафрагмы и яркостью изображения

Отношение отверстия диафрагмы к фокусному расстоянию фотографического об'ектива называется относительным отверстием последнего. Яркость изображения, проектируемого об'ективом, для далеко отстоящих предметов пропорциональна квадрату относительного отверстия.

Если через $\delta s$ обозначим небольшую поверхность некоторого участка об'екта, через $\delta i$— силу света, посылаемую об'ектом, то

$i\delta s$ определяет количество лучистой энергии, излучаемой этим маленьким участком $\delta s$ (см. рис. 6).

Часть этого количества энергии, воспринимаемая об'ективом, будет равна $iw\delta s$, где $w$ означает телесный угол, под которым видно отверстие об'ектива с этого участка поверхности $\delta s$. Воспринятое количество энергии подводится соответствующему участку изображения, где оно распределится на поверхности $\delta S$ и тогда поверхностная яркость изображения будет иметь величину:

$$i' = \frac{iw\delta s}{\delta S}.$$

Телесный угол $w$ можно выразить отношением:

$$w = \frac{\pi d^2}{16 \pi u^2} = \frac{d^2}{16 u^2},$$

где $d$ означает диаметр диафрагмы, а $u$ — расстояние до об'екта. С другой стороны, масштаб определяется из выражения:

$$\frac{\delta s}{\delta S} = \frac{u^2}{v^2},$$

где $v$ означает расстояние до изображения; следовательно, в конечном результате получаем:

$$i' = i \frac{d^2}{16 u^2} \cdot \frac{u^2}{v^2} = k \cdot i \cdot \frac{d^2}{v^2},$$

а для очень удаленных предметов, когда $v = f$, эта формула приобретает следующий вид (при $k = 1$):

$$i' = i \frac{d^2}{f^2}.$$

В соответствии с принятыми международными обозначениями диафрагмы обычно определяются из отношения к фокусному расстоянию, так как продолжительность экспозиции пропорциональна яркости изображения. Так, например, имеем следующий ряд:

| Относительное отверстие | f/4 | f/5,6 | f/8 | f/11 | f/16 | f/22 | f/32 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Продолжительность экспозиции | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 |

Если пренебречь потерями на отражение и поглощение, то величина относительного отверстия (частного от деления диаметра отверстия на фокусное расстояние) определяет степень использования об'ектива при различной степени диафрагмирования:

для обозначения этих величин применим также термин яркость. Потери света на отражение в нормальных об'ективах в зависимости от числа граничащих с воздухом поверхностей оцениваются приблизительно в 20—50%; потери же света на поглощение ничтожны (для видимого света). Отражения от несклеенных поверхностей, направленные в сторону изображения, могут довольно сильно отразиться на качестве изображения: когда явления отражения очень заметны, то говорят о «световых пятнах» и «побочных изображениях». Об'ективы с относительными отверстиями от 1 : 2 до 1 : 5 называются светосильными об'ективами. Об'ективы с относительными отверстиями от 1 : 5 до 1 : 8 считаются об'ективами средней светосилы, а с отверстием ниже 1 : 8 — с малой светосилой.

Вообще же надо сказать, что в погоне за большой яркостью (светосилой) приходится жертвовать углом поля зрения и резкостью. Углом поля зрения мы называем угол, образованный крайними лучами, лежащими в одной плоскости и могущими войти в камеру. Если этот угол обозначить через $\alpha$, то величина его определится из отношения:

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}=\frac{1}{2}\ \frac{\text{длинная сторона пластинки}}{\text{фокусное расстояние об'ектива}}$$

Если угол $\alpha$ меньше 45°, то об'ектив имеет малый угол зрения, при 45—70° его называют нормальным, если же $\alpha$ выше 75°, то такой об'ектив называется широкоугольным.

## Литература

M. v. Rohr, Theorie und Geschichte des photographischen Objektivs, Berlin, J. Springer, 1899.

A. Gleichen, Die Theorie der modernen optischen Instrumente, 2, Aufl., Stuttgart, F. Enke, 1925.

H. Harting, Die photographische Optik, 2. Aufl. (aus H. W. Vogel, Handbuch der Photographie, herausgeg, von E. Lehmann, Bd. II, Teil I), Berlin, Union Deutsche Verlagsgesellschaft, o. J. (1924).

A. Lockett, Camera Lenses, London, Henry Greenwood & Co, Ltd., 7925.

J. M. Eder, Ausführliches Handbuch der Photographie, Bd. I, Teil 4; Die photographischen Objektive, Halle a. S., W. Knapp, 1911 (3 Aufl.).

2 ГЛАВА

# ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ОПТИКА

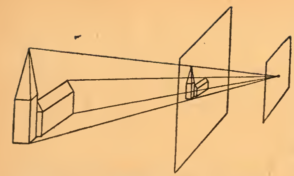
А. Е. КОНРАДИ

В последующем изложении мы намерены описать фотографическую оптику с точки зрения потребителя фотографических линз, а не конструктора этого вида приборов. Поэтому не будем входить в подробности расчета об'ектива, а ограничимся главным образом той частью темы, которую необходимо рассмотреть для ясного представления образования изображения. Мы разберем вопросы перспективы и резкости изображения, а также постараемся установить пределы последней в той мере, в какой она зависит от различных аберраций и отчасти от самой природы света.

Фотографический об'ектив служит для получения по возможности правильного плоского изображения любого об'екта путем воздействия на светочувствительный слой тех именно лучей света, которые исходят от об'екта. Начнем с того, что определим понятие правильного изображения.

## Идеальное (правильное) изображение

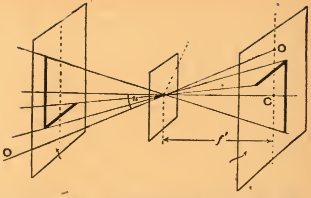
В большинстве случаев фотографируемые предметы трехмерны. Мы требуем, чтобы подобный об'ект, как бы велик он ни был, сколько бы деталей он ни содержал, как можно более правильно изображался на плоской поверхности. Если мы обратимся к ландшафту, то нам известно, что с разных точек наблюдения ландшафт будет выглядеть по-разному. Если мы станем менять место наблюдения, то ближайший к нам об'ект всегда будет заслонять каждый раз другую часть фона. Далее известно, что на одном и том же изображении ближайшие об'екты мы не в состоянии представить с двух сторон. Из перечисленных фактов можно сделать следующий вывод: безошибочная передача какого-либо об'екта возможна только при условии фиксирования наблюдательного пункта, а именно точки зрачка наблюдателя.



12. Слева — изображаемый об'ект, посредине — плоскость зарисовки (стеклянная пластинка), вправо — точка зрачка наблюдателя (Augpunkt)

Эту точку зрачка мы создаем при помощи экрана с небольшим отверстием. Когда мы смотрим через отверстие, то ближайший к нам предмет виден однозначно относительно фона и, исходя из него, мы можем зарисовать всю картину. С этой целью мы вертикально устанавливаем стеклянную пластинку между изображаемой точкой об'екта и нашей точкой зрачка, а вместо карандаша берем алмаз. Теперь мы можем безукоризненно точно зарисовать лежащий перед нами об'ект, нанося точку за точкой, линию за линией так, как они представляются глазу спроектированными на поверхности стеклянной пластинки. Если к этим очертаниям добавим еще тени и окраску, то готовый рисунок будет представлять собой правильное изображение об'екта, так как каждая точка и каждая линия нашего рисунка в точности перекрывают, конечно исходя из выбранной нами точки зрачка, соответствующую точку или соответствующую линию об'екта. Подобное изображение можно считать идеалом безукоризненного перспективного рисунка; его можно сопоставить с фотографическими снимками, сделанными в том же масштабе фотографической линзой, исходя из той же самой точки зрачка. Наш перспективный рисунок будет обладать свойством покрывать переданный в нем об'ект точку за точкой и линию за линией, каково бы ни было положение плоскости зарисовки, так как с геометрической точки зрения перспектива всегда правильна, независимо от того, находится ли плоскость зарисовки в вертикальном положении, или образует с вертикалью некоторый угол. В силу давно сложившейся условности мы обычно изображаем предметы в вертикальной плоскости зарисовки и потому привыкли к такому виду перспективы, а уклонение от этой нормы расцениваем как искажение. Можно сказать, что требование вертикально поставленной плоскости зарисовки следует рассматривать как чисто условное и не оправдываемое с геометрической и логической точек зрения. Подобие между нашей зарисовкой и действительным об'ектом следует из факта прямолинейного распространения света. Действительно, луч света равносилен для нас понятию о прямой линии (искривление лучей света при прохождении их вблизи больших масс по А. Эйнштейну можно здесь не принимать во внимание). Установка плоскости зарисовки, изображенная на рис. 12, не может быть использована для получения изображения на светочувствительной пластинке, так как последняя была бы сплошь зачернена падающим светом. Если же лучам, проектирующим изображение на плоскость зарисовки, дать пройти

через точку зрачка, и затем дальше, позади точки зрачка устроить темное помещение, в котором экспонировать светочувствительную пластинку этими лучами, то при такой установке можно получить фотографическое изображение (сперва конечно латентное). Обратимся к рис. 13, на котором плоскость зарисовки изображена влево, а светочувствительная пластинка вправо от точки зрачка. Ясно, что изображение на светочувствительной пластинке будет обратным, так как в точке зрачка лучи пересекутся. Если плоскость зарисовки строго параллельна светочувствительной пластинке, то на основании законов геометрии между рисунком и изображением на светочувствительной пластинке должно быть подобие. Масштаб изображения на светочувствительной пластинке определится из отношения расстояний обеих плоскостей от точки зрачка. Согласно этим рассуждениям изображение на фотографической пластинке является тоже правильным отображением передаваемого трехмерного пространства. Из рис. 13 ясно, что на светочувствительной пластинке буква *L* кажется обращенной только при рассматривании ее справа или, выражаясь фотографическим языком, со стороны стекла. Если же рассматривать букву *L* слева (со стороны точки зрачка наблюдателя или, иначе говоря, со стороны слоя светочувствительной пластинки), то эта буква видна как в зеркале. Это обстоятельство используется в ферротипных процессах, а также в различных фотомеханических способах, при которых окончательно получаемое изображение должно иметь ориентировку лицевой стороны оригинала (замена обращающей призмы).



**13.** Образование на светочувствительной пластинке изображения при помощи камеры с малым отверстием. Слева—плоскость зарисовки (стеклянная пластинка), посредине точка зрачка наблюдателя (отверстие камеры), справа—светочувствительная пластинка

## Свойства изображения, полученного в камере с малым отверстием (стенопом)

Так как полученное выше изображение (рис. 12) мы хотим использовать как образец безукоризненной перспективы для сравнения его с изображением, спроектированным фотографическим об'ективом, постараемся сейчас установить характеристические особенности такого идеального стенопического изображения.

1. Приготовим очень точный тестоб'ект, состоящий из двух групп, расположенных на плоскости, перпендикулярных и пересекающихся прямых линий. Когда с такого тестоб'екта делается снимок, то последний должен вполне совпадать с оригиналом. Для того чтобы испытание было свободно от погрешностей, необходимо: а) чтобы рисунок тестоб'екта был очень точным; б) тестоб'ект должен представлять плоскость; в) светочувствительная пластинка также должна быть совершенно плоской; г) плоскость светочувствительной пластинки должна быть строго параллельна плоскости тестоб'екта.

Последнее условие не является необходимым в том случае, когда желательно только испробовать, будет ли прямая линия изображена прямой при всяких положениях пластинки. Отсюда для теории фотографического об'ектива следует вывод, что система, передающая прямую линию в виде прямой, будет правильно проектировать перспективу.

2. При желании провести испытание с математической точностью необходимо снова обратиться к рис. 13. Этот метод важен как для конструкторов фотографических линз, так и для случаев фотограмметрического применения фотографии. Если прямая, направленная на очень удаленную точку *O*, образует с перпендикуляром, опущенным из точки зрачка на фотографическую пластинку, угол $u$, и расстояние от точки зрачка до пластинки равно $f'$, то расстояние точки изображения $O'$ от основания $C$ должно быть равно $f' . tg\, u$, при всех значениях $u$.

3. Более простое испытание, которое можно применить во всех случаях, не требующих очень большой точности, основывается на следующем рассуждении. Если в запечатлеваемом пространстве дана какая-нибудь произвольно ориентированная прямая линия, не пересекающая при продолжении точку зрачка, то лучи, отбрасываемые отдельными точками этой прямой и пересекающие точку зрачка, должны лежать в одной плоскости, так как плоскость определяется прямой и лежащей вне ее точкой. Когда лучи пересекут точку зрачка, то их продолжения за эту точку будут лежать в той же плоскости, которая в месте пересечения со светочувствительной пластинкой должна дать прямую линию. Поэтому перспектива фотографического изображения правильна лишь в том случае, когда прямая линия, любым образом ориентированная, передается тоже прямой линией. Вполне подходящим для такого испытания об'ектом является хорошо нагруженный свинцовый отвес. Естественный морской горизонт для этой цели не подходит, так как он имеет кривизну, заметную при наблюдении с некоторой высоты даже невооруженным глазом.

В изображениях, получаемых фотографическими об'ективами, искажение точной перспективы, даваемой стенопом, обычно об'ясняется дисторсией. Оптические системы, свободные от дисторсии, большей частью называются ректилинеарами; название указывает на свойства этих систем.

Наше определение правильной перспективы основано на том критерии, что изображение перекроет точка в точку и линия в линию снимаемый об'ект, если оно будет помещено на правильном рас-

стоянии $f'$ от глаза, а именно сдвинуто в сторону об'екта, повернуто на 180° и параллельно первоначальному положению. В соответствии с нашим определением изображение, спроектированное стенопом или ректилинеаром, дает правильную перспективу. Часто при рассматривании снимков, сделанных превосходными оптическими системами, в первый момент перспектива кажется очень неправильной (например снимки домов, у которых вертикальные линии на фасаде сходятся или расходятся, в то время как они в действительности параллельны друг другу; портреты, смахивающие на карикатуру; снимки больших помещений, производящих впечатление крохотных комнат) — все эти изображения производят п р а в и л ь н о е впечатление при следующих условиях: а) если при рассматривании их поместить глаз на том же самом расстоянии, на каком снимки находились от отверстия стенопа или второй главной точки об'ектива в момент с'емки, и б) если они образуют с горизонталью тот же угол, что и светочувствительная пластинка в момент с'емки.

Таким образом перспектива, свойственная таким изображениям, не ложная перспектива, она только кажется необычной при обычном способе рассматривания. Для получения нормально кажущихся снимков при фотографировании, например зданий, необходимо, чтобы светочувствительная пластинка располагалась вертикально; при портретной с'емке фотографируемое лицо должно находиться от аппарата на расстоянии, не меньшем 3 *м*. Упомянутый выше эфект, когда при с'емке внутри помещений нельзя составить правильного представления о их размерах, получается при работе с широкоугольными об'ективами. Картина — произведение кисти художника — охватывает обычно угол в 30—40°, и уже успела создаться привычка рассматривать эти картины с соответствующего расстояния. Поэтому изображения, охватывающие значительно больший угол не производят приятного впечатления. Нормальное расстояние наилучшего зрения для человека равно 25 *см*, снимки, сделанные об'ективом с фокусным расстоянием, меньшем 25 *см*, обычно рассматриваются с неправильного расстояния и потому производят неприятное впечатление.

Известно, что неприятный вид некоторых изображений зависит не от перспективы, а от того обстоятельства, что условия с'емки не соответствовали определенным художественным правилам, умелое использование которых наблюдается обычно только у профессиональных фотографов. Конструктор об'ектива должен заботиться только о том, чтобы перспективы изображений отвечала вышепоставленным условиям; не его вина, что широкоугольный об'ектив лишь случайно может дать приятный, художественный снимок.

## Панорамные снимки

Следует указать еще на один, правда, мало распространенный, вид фотографических снимков, а именно на так называемые панорамные изображения. Такие снимки делают на цилиндрических поверхностях (для этого применяется пленка). Ось цилиндра про-

ходит через точку зрачка наблюдателя; из этой же точки надо потом рассматривать изображение. Если при панорамной с'емке пользуются соответствующими линзами, то изображение получается правильное в смысле изложенных выше требований, т. е. при рассматривании из точки зрачка наблюдателя оно должно перекрывать об'ект, если вновь придать ему цилиндрическую форму. При указанных условиях рассматривания подобные изображения кажутся вполне правильными и производят в высшей степени приятное впечатление при соответствующем увеличении (конечно расстояние от глаза тоже должно быть соответственно увеличено). Однако в большинстве случаев панорамные снимки неправильно монтируются, что и вызывает кажущееся искажение.

## Недостатки снимков, сделанных стенопом

Безукоризненная перспектива изображения, получаемого при помощи стенопа, полностью недостижимая в случае применения фотографического об'ектива, даже если последний был очень тщательно рассчитан, страдает двумя недостатками. Первый из них — это чрезвычайно малая яркость изображения, а вторая — недостаточная резкость его. С точки зрения геометрической оптики крайне желательно сделать отверстие камеры, как можно меньшего диаметра, так как бесконечно малое отверстие пропустило бы от каждой точки об'екта только один луч, который упал бы на светочувствительную пластинку в одной точке, точке изображения.

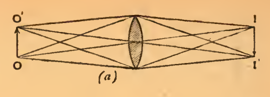
С другой стороны, одним из важнейших подтверждений волновой теории света является то обстоятельство, что опыт, проведенный при помощи камеры с очень малым отверстием, не подтверждает выводы геометрической оптики. Если при одинаковом растяжении стенопа последовательно испробовать ряд отверстий убывающей величины, то обнаруживается, что имеется определенный предел уменьшения отверстия, ниже которого наступает уже все большее и большее ухудшение изображения; при переходе известной границы изображение совершенно расплывается. Далее, надо заметить, что отверстие, соответствующее определенному растяжению камеры, не подходит для другого, сильно измененного растяжения. Волновая теория света дает следующее полное и ясное об'яснение результатов такого опыта; лучи, входящие через отверстие, и лучи претерпевающие дифракцию на краю отверстия, интерферируют между собой. Теория интерференции подробно изложена в учебниках физической оптики, в части, интересующей нас, укажем только, что наиболее подходящее отверстие $A$ стенопа при данной длине растяжения $f'$ для сильно удаленного предмета есть:

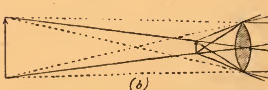
$$A^2 = 0{,}00175 \cdot f' \ (мм^2)$$

Это выаржение дает следующие значения $A$ для различных растяжений стенопа:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $f' =$ 75 *мм* | 100 *мм* | 150 *мм* | 250 *мм* |
| | $A =$ 0,350 *мм* | 0,425 *мм* | 0,5 *мм* | 0,65 *мм* |
| Относительное отверстие | $\frac{A}{f'} = \frac{1}{200}$ | $\frac{1}{230}$ | $\frac{1}{300}$ | $\frac{1}{380}$. |

Числа третьей строки дают представление о яркости изображения в стенопе. Если, предположим, при относительном отверстии $f/22$, при хорошем освещении пластинки нормальной чувствительности (с'емка на воздухе) требуется продолжительность экспозиции в 1 сек., то, учтя, что продолжительность экспозиции возрастает обратно пропорционально квадрату относительного отверстия, получим, что для фотографирования стенопом продолжительность экспозиции измеряется несколькими минутами и для с'емки внутри помещений стеноп совершенно непригоден. Волновая теория света дает нам возможность рассчитывать также и резкость изображений, т. е. величину кружка рассеяния. Ниже помещены диаметры $Z$ кружка рассеяния соответственно указанным выше относительным отверстиям или же растяжениям камеры:




**14.** Действие собирательной линзы: *a*—образование действительного изображения (об'ект расположен дальше фокусного расстояния); *b* — образование мнимого изображения (об'ект расположен ближе фокусного расстояния)

| | | |
|---|---|---|
| $f^1 = 75$ *мм* | $f^1 = 150$ *мм* | $f^1 = 250$ *мм* |
| $z = 0{,}1$ „ | $z = 0{,}15$ „ | $z = 0{,}2$ „ |

Указанные размеры кружков рассеяния соответствуют степени резкости, которая в случае хороших фотографических снимков получается на краю поля изображения. Таким образом стеноп надлежащих размеров может поспорить с современной фотокамерой (с об'ективом), когда речь идет о большем поле изображения. Приведенное выше сопоставление показывает также, что величина «точки» изображения, полученного стенопом, равна одной трети диаметра отверстия камеры. Рассуждая строго геометрически, «точка» изображения должна была бы представлять проекцию отверстия на плоскость изображения, следовательно для сильно удаленных предметов она должна была бы равняться диаметру отверстия. Факт волнообразного распространения света приводит однако к иной картине, чем следовало бы ожидать, исходя из геометрических рассуждений.

## Основные свойства линз (фотографических об'ективов)

Ввиду того, что в каждом учебнике физики более или менее подробно рассматриваются элементарные свойства линз, считаем известным следующее: простая собирательная линза или система линз, обладающая собирательным действием (рис. 14), преломляет идущие от об'екта *OO'* лучи таким образом, что получается обращенное, действительное, или прямое, мнимое изображение. Пер-

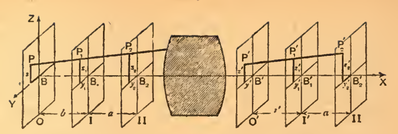
вый случай наблюдается в об'ективе камеры, а второй — у лупы (увеличительного стекла). В чрезвычайно маловероятном случае, когда об'ект расположен в точности в переднем фокусе об'ектива, все исходящие из точки об'екта лучи выходят параллельным пучком и на конечном расстоянии не получается никакого изображения.

Характерное свойство положительной линзы заключается в том, что все лучи света, выходящие из какой-либо точки об'екта, путем преломления собираются в соответственной (сопряженной) точке изображения, действительной или мнимой; в последнем случае лучи из линзы выходят таким образом, что они только кажутся идущими от точки изображения. Из этих положений можно сделать важные выводы. Первый из этих выводов следующий: каждый луч, выходящий из точки об'екта и проходящий отдельную линзу или систему линз, должен пройти через сопряженную точку изображения; каждый луч есть геометрическое место (в понимании Эвклида), на котором должна лежать точка изображения. Второй вывод следующий: двух лучей, выходящих из одной и той же точки об'екта (конечно по разным направлениям), достаточно, чтобы определить положение точки изображения; т. к. последняя должна лежать на обоих лучах, то она может находиться только в точке пересечения этих лучей. На этих двух выводах основываются все графические методы определения расположения точки изображения. В системах линз, дающих несовершенные изображения, положение точки пересечения меняется в зависимости от выбранных лучей; степень неопределенности положения точки есть величина того же порядка, что и диаметр кружка рассеяния.

Следующим важным свойством линзы или системы линз является то обстоятельство, что система проектирует изображения всех об'ектов, в том числе и отдельных частей самой системы. Такие изображения играют, с одной стороны, важную роль в теории фотографических об'ективов, а, с другой — являются причиной определенных, возникающих при пользовании об'ективами мешающих явлений; сюда относятся так называемые побочные изображения.

## Теория идеальной системы об'ектива

Основные моменты зависимости между об'ектом и его изображением обычно рассматривают, исходя из гауссовской теории систем оптических стекол. Эта теория пригодна только для случаев очень малого отверстия и очень малого поля изображения, т. е. распространяется на так называемое приосевое пространство (вокруг оптической оси системы оптических стекол). Эрнст Аббе, знаменитый сотрудник К. Цейсса в Иене создал чисто геометрический метод решения нашей проблемы, свободный от ограничений, присущих методу Гаусса. Мы будем придерживаться метода Аббе. Элементарная оптика учит, что центрированная система линз дает геометрически безукоризненные изображения с правильной перспективой в тех случаях, когда отверстие и поле зрения в доста-




**15. К теории образования изображения системой линз**

точной мере ограничены. С другой стороны, наши современные фотографические об'ективы показывают, что при удачно подобранных сортах стекла, кривизне линз и их взаимных расстояниях можно сохранить достаточно большое отверстие даже при наличии значительного поля зрения. Таким образом в настоящее время к системе линз, следует пред'являть требование, которое можно определить следующим образом:

«Безукоризненно правильной, идеальной системой линз является такая, которая все точки об'екта, лежащие в плоскости перпендикулярной оптической оси, резко и без дисторсии изображает в плоскости, тоже перпендикулярной оптической оси (сопряженной плоскости)».

Такое определение, выраженное на обычном фотографическом языке, означает, что плоский тестоб'ект должен изображаться на матовом стекле в виде уменьшенной или увеличенной вполне резкой и геометрически подобной репродукции оригинала.

Постараемся доказать, что линза выполняет это требование для любого заданного расстояния до об'екта, если она выполняет его для двух различных расстояний.

В качестве условия принимается, что изображенная на рис. 15 система линз проектирует безукоризненные изображения об'ектов, расположенных в плоскости *I*. Эта плоскость перпендикулярна оси и пересекается с последней в точке $B_1$. Соответствующие изображения лежат в сопряженной плоскости *I'*, тоже перпендикулярной оси и пересекающейся с последней в точке $B_1$. Далее принимаем, что аналогичные соотношения имеются у плоскостей *II* и *II'*. Расстояние между плоскостями *I* и *II*, т. е. расстояние $B_1B_2 = a$, а расстояние между плоскостями *I'* и *II'*, т. е. $B'_1B'_2 = a'$. Обозначим затем линейное увеличение изображения *I'* через $M'_1$; это означает, что точка $P_1$ плоскости *I* с координатами $y_1$ и $z_1$ изображается точкой $P'_1$, координаты которой $y'_1 = M'_1 \cdot y_1$ и $z'_1 = M'_1 \cdot z_1$. Соответственно увеличение $M'_2$ в плоскости *II'* означает, что точка $P_2$ плоскости *II*, определяемая координатами $y_2$ и $z_2$, изображается в $P'_2$, координаты которой $y'_2 = M'_2 \cdot y_2$ и $z'_2 = M'_2 \cdot z_2$. Числа, определяющие увеличение, положительны для прямого изображения (на рис. 15 дан как раз такой случай) и отрицательны для обращенного изображения. Эти числа больше единицы, когда изображение больше соответствующего об'екта, и они меньше единицы, т. е. правильные дроби, когда изображение меньше соответствующего об'екта. Далее полагаем, что $M'_1$ и

$M'_2$ — определенные, конечные и не равные между собой числа. Представим теперь себе другую также перпендикулярную оси плоскость $O$, пересекающуюся с осью в точке $B$; расстояние $OI = BB_1 = b$. Пусть в этой плоскости имеется точка $P$ с координатами $(y, z)$. Выходящий из этой точки луч, если он направлен на систему линз, должен пересечь две плоскости $I$ и $II$; точки пересечения будут $P_1$ и $P_2$. Координаты точки $P_1$ обозначим через $y_1$ и $z_1$.

Так как луч света представляет прямую линию, то $P_2$ должна лежать на $PP_1$, таким образом ее координаты определяются однозначно. Учитывая, что прямая линия имеет постоянный угол направления, из подобия треугольников выводим следующее: так как наш луч, пройдя участок $d$,изменил свою $y$-координату из $y$ в $y_1$, то при прохождении участка $(b + a)$ $y$-координата меняется от $0$ до $II$ на $(y_1 - y_2) \cdot \frac{(b+a)}{b}$, поэтому

$$y_2 = y + (y_1 - y) \cdot \frac{(b+a)}{b} = y_1 \cdot \frac{(a+b)}{b} - \frac{ya}{b}.$$

Те же выводы касаются и $z$-координаты; следовательно:

$$z_2 = z_1 \cdot \frac{(a+b)}{b} - \frac{za}{b}.$$

Теперь рассмотрим в пространстве изображения луч $P'P_1'P_2'$ (с правой стороны системы), после того как он прошел оптическую систему. Так как этот луч проходит через точку $P_1$, то его можно рассматривать, как выходящий из этой точки. Эта точка согласно нашему определению будет резко изображена в плоскости $I'$, при этом координаты точки $P_1'$ будут: $y'_1 = M'_1 y_1$ и $Z' = M'_1 Z_1$

На основании такого же рассуждения можно рассматривать луч выходящим и из точки $P_2$, определяемой на плоскости $II$ координатами:

$$y'_2 = M'_2 \cdot y_2 \quad \text{и} \quad Z'_2 = M'_2 \cdot z_2.$$

Последние величины с учетом прежде полученных для $y_2$ и $z_2$ значений можем выразить в следующей форме:

$$y_2' = M_2' [y_1 (a+b)/b - ya/b] \text{ и } Z_2' = M_2' [z_1 (a+b)/b - za/b]$$

Таким путем мы установили две точки выходящего луча, сопряженного с лучом $PP_2$. Так как прямая определяется двумя точками, то путь луча, выходящего из системы, тем самым найден. Теперь можно определить точку, в которой этот луч пересекает заданную плоскость, перпендикулярную оси. На рис. 15 такой плоскостью является $O'$, расстояние которой $B'B_1'$ от плоскости $I'$ обозначим через $b'$. Исходя из положения, что прямая линия имеет постоянное направление, можем написать следующие соотношения (координаты точки пересечения с плоскостью $O'$ обозначим через $y'$, $z'$):

$$(y_1' - y')/b' = (y_2' - y')/(b' + a')$$
$$(z_1' - z')/b' = (z_2' - z')/(b' + a').$$

Эти формулы можно преобразовать в

$$a'y' = y_1'(a' + b') - y_2'b'$$
$$a'z' = z_1'(a' + b') - z_2'b'.$$

Ввиду того, что уравнения для $z$-координаты совершенно аналогичны уравнениям для $y$-координаты, все последующие преобразования мы проделаем только над выражениями для $y$.
Если в полученное выше выражение подставим найденные раньше значения для $y_1'$ и $y_2'$, то после некоторого упрощения, получим:

$$y' = \frac{yM_2'b'a}{a'b} + \frac{y_1}{a'}\left[M_1'(a' + b') - M_2'b'\,\frac{a+b}{b}\right].$$

Приведенное уравнение показывает, что положение точки $P'$, в которой выходящий луч пересекает находящуюся в любом месте нормальную плоскость $O'$, зависит от положения точки $P_1$ в плоскости $I$. Поэтому всякий другой луч, выходящий из точки об'екта $P$, будет пересекать плоскость $O'$ в другой точке. Результат этого тот, что в этой плоскости, если положение ее выбрано произвольно, спроектируется нерезкое изображение. Другого результата нельзя и ждать, так как известно, что при произвольном растяжении камеры мало вероятно, чтобы получилось резкое изображение определенного об'екта. Однако из нашего уравнения можно сделать следующий вывод: изменение положения точки изображения $P'$ зависит от введенного нами в вышепредложенную формулу фактора, стоящего в квадратных скобках; если этот фактор будет равен $0$, то зависимость положения $P'$ от точки $P_1$ будет отсутствовать. Выражение, поставленное в квадратные скобки является линейной функцией $b'$, поэтому для $b'$ существует такое значение и притом только одно, при котором это выражение уничтожается. Таким образом имеется совершенно определенная точка $P'$, через которую должны проходить все лучи, исходящие из $P$; эта точка и будет фокусом для $P$. Если выражение в квадратных скобках мы приравняем к нулю и решим относительно $b$, то получим следующее значение:

$$b' = \frac{a'M_1'}{M_2'(a+b)/b - M_1'}. \qquad 1$$

В случае нулевого значения выражения, заключенного в прямые скобки, $y'$ будет иметь значение.

$$y = \frac{yM_2'b'a}{a'b};$$

если теперь подставить в него полученное значение для $b'$, то

$$y' = y\,\frac{a}{b}\;\frac{M_1'M_2'}{M_2'(a+b)/b - M_1'}; \qquad 2$$

соответствующее уравнение для $z$ будет:

$$z' = z\,\frac{a}{b}\;\frac{M_1'M_2'}{M_2'(a+b)/b - M_1'}; \qquad 2a$$

Отсюда само собой следует, что $\frac{y'}{y} = \frac{z'}{z}$ причем эти выражения обозначают линейное увеличение $M'$, с которым об'екты плоскости $O$ изобразятся в сопряженной плоскости $O'$. Поэтому для $M'$ получится выражение:

$$M' = \frac{a}{b} \quad \frac{M_1' M_2'}{M_2'(a+b)/b - M_1'}. \qquad 3$$

Уравнения 1, 2 и 3 составляют теорию образования изображения Аббе и означают, что система линз, безукоризненно правильно проектирующая об'екты, расположенные в двух определенных перпендикулярных к оси плоскостях, будет безукоризненно проектировать плоскости об'екта, находящиеся на любом расстоянии и тоже перпендикулярные к оси, так как согласно нашему уравнению (1) для любой плоскости $O$, отстоящей на расстоянии $b$ от плоскости $I$, имеется сопряженная плоскость $O'$ на расстоянии $b'$ от плоскости $I'$, в которой резко изобразится каждая точка плоскости $O$. Согласно уравнениям (2) и (3) эти изображения не только резки, но кроме того имеют определенную степень увеличения, таким образом они свободны также и от дисторсии.

Из уравнений (1), (2) и (3) можно сделать еще некоторые выводы для нашей системы линз. Две плоскости, в которых резко изображаются (фокусируются) очень удаленные плоскости об'екта, называются плоскостями главного фокуса системы. Точки, в которых оптическая ось пересекается с этими плоскостями, называются главными фокусными точками. Главная фокусная точка, расположенная в пространстве об'екта, называется первой, или передней главной фокусной точкой, а расположенная в пространстве изображения — второй, или задней главной фокусной точкой. Положение этих точек и плоскостей выводится из уравнения (1). Если плоскость об'екта сильно отодвигается влево, $b$ возрастает и в конце концов становится очень большой величиной; поэтому, принимая, что $a$ имеет конечное значение и следовательно $\frac{a}{в}$ — бесконечно малая величина, уравнение (1) может быть приведено к следующему виду:

$$b'_f = \frac{a' M_1'}{M_2' - M_1'}, \qquad 4$$

причем значение $b'$ в данном случае мы выражаем через $b'_f$ ($b'_f$ есть расстояние второй главной фокусной точки от плоскости $I'$).

С другой стороны, $O$ перемещается в переднюю фокусную точку, когда сопряженная плоскость $O'$ сильно сдвигается вправо; положение передней фокусной точки определится требованием, чтобы в уравнении (1) величина $b'$ получила очень большое значение. По условию $a'$ и $M_1'$ — конечные величины; таким образом требования будет выполнено, когда знаменатель в правой части нашего уравнения (1) будет равен нулю. Отсюда следует:

$$\frac{M_2'(a+b)}{b} = M_1'.$$

Если мы решим это уравнение относительно $b$ и полученное специальное значение назовем $b'$, так как оно определяет расстояние передней плоскости главного фокуса от плоскости $I$, то будем иметь:

$$b_f = -\frac{aM_2'}{M_2' - M_1'}. \qquad 5$$

Обе главные фокусные точки, вычисляемые из уравнений (4) и (5), легко определяются в фотографическом об'ективе экспериментальным путем. Для этого данный об'ектив надо направить на очень отдаленный об'ект и определить расстояние соответствующего резкого изображения в двух положениях об'ектива: направляя на этот об'ект один раз переднюю поверхность об'ектива и второй раз — заднюю. Обе главные фокусные точки несомненно являются наиболее физически заметными точками, исходя из которых измеряются расстояния до об'екта и до изображения; кроме того они имеют то преимущество, что приводят к наиболее простым формулам, определяющим отношения между об'ектом и его изображение. Эти формулы получаются просто комбинированием уравнений (4) и (5) с уравнениями (1) и (3), из которых последние два годятся для всех расстояний до об'екта и для всех степеней увеличения $M'$. Уравнение (4) дает расстояние задней главной фокусной точки от плоскости $I'$, а уравнение (1) — расстояние любой плоскости изображения от той же плоскости $I'$. Тем самым расстояние второй фокусной точки от любой плоскости изображения составляет $b'_f - b'$; обозначив это расстояние через $x_f$ получим:

$$x'_f = b'_f - b'.$$

Если в это уравнение подставим значения $b'_f$ и $b'$ из уравнений (4) и (1), то получим:

$$x'_f = \frac{a'M_1'}{M_2' - M_1'} - \frac{a'M_1'}{M_2'(a+b)/b - M_1'} = \frac{\frac{a'M_1'M_2'(a+b)}{b} - a'M_1'M_2'}{(M_2' - M_1')\left[\frac{M_2'(a+b)}{b} - M_1'\right]}.$$

Это выражение после всех преобразований приобретает следующий вид:

$$x'_f = \frac{a'}{M_2' - M_1'} \cdot \frac{\frac{M_1'M_2'a}{b}}{M_2'\frac{a+b}{b} - M_1'} = M'\frac{a'}{M_2' - M_1'},$$

причем в последнем преобразовании используется уравнение (3). Для расстояния $x_f$ любой плоскости об'екта от передней главной фокусной точки легко найти следующую зависимость:

$$x_f = b_f - b = -\frac{aM_2'}{M_2' - M_1'} - b.$$

После соответствующих преобразоваиий получим:

$$x_f = -\frac{aM_1'M_2'}{M_2'-M_1'} \frac{M_2'(a+b)-bM_1'}{aM_1'M_2'} = -\frac{aM_1M_2'}{M_2'-M_1'} \cdot \frac{1}{M'},$$

причем снова пользуемся уравиеиием (3).
Уравнеиие для $x'_f$ определяет расстояние от задней главиой фокусиой точки до плоскости изображения, в которой проектируется изображение при увеличеиии $M'$.

Множитель $\frac{a'}{M_2'-M_1'}$ представляет коистаиту.

Аиалогичиым путем из уравнеиия $x_f$ определяется расстояние от передией главной фокусиой точки до плоскости об'екта, изображающегося в масштабе $M'$, при этом множитель $\frac{aM_1'M_2'}{M_2'-M'_1}$ — тоже констаита.
Оба уравиения дают возможность простого решеиия проблемы практической фотографии — определения расстояиий до об'екта и до изображения, при которых получаются заданные увеличения или уменьшения.
Упомяиутые постоянные множители с соответствующими зиаками обычио называются эквивалеитиыми фокусными расстояниями какой-либо системы линз. Обычиые обозиачеиия для этих величин — $f'$ или $f$.
Таким образом для пространства изображения (в правой стороне системы) мы имеем:

$$f' = -\frac{a'}{M_2'-M'_1}, \tag{6}$$

а для простраиства об'екта (в левой сторoие системы):

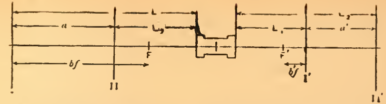
$$f = \frac{aM_1'M_2'}{M_2'-M_1'}. \tag{7}$$

Следовательно для $x_f'$ или $x_f$ уравнения приобретают вид:

$$x'_f = -f'M'; \quad x_f = -\frac{f}{M'}; \quad x_f x'_f = ff'. \tag{8}$$

## Экспериментальное определение констант фотографического об'ектива

Уравиения от (4) до (7) достаточны для определения эквивалентиых фокусных расстояний и положения фокусных точек фотографического об'ектива, а уравнение (8) позволяет получить расстояния до об'екта и до изображения для желаемой степени увеличеиия.
*Наиболее распространенный метод.* Проделаем некоторые точиые измерения и воспользуемся изложенной выше теорией. Из




**16. Определение фокусного расстояния фотографического об'ектива**

рис. 16 видно, что камера установлена против соответствующего тестоб'екта (для этой цели можно пользоваться обыкновенной шкалой, которая получится в уменьшенном виде); измеряем расстояние $L_1$ этого тестоб'екта или шкалы от надлежаще нанесенной на оправе об'ектива метки, равно как и расстояние $L'_1$ от нее же или от другой метки до матового стекла, на которое резко проектируется изображение об'екта. Отмечаем масштаб этого изображения $M'_1$ (последний получается, как частное от деления линейной величины изображения на линейную величину предмета). Возьмем следующий численный пример: $L_1 = 863{,}6$ *мм*, $L'_1$ составляет 196,6 *мм;* при этом отрезок длиной в 254 *мм*, находящийся на плоскости *I*, имеет на матовом стекле длину 55,9 *мм*, откуда $M'_1 = -0{,}22$ (увеличение отрицательное, так как изображение обращенное). Затем изменяем расстояние камеры от тестоб'екта. Новые измерения дают следующие величины: $L_2 = 241{,}6$ *мм*, $L'_2 = 457{,}2$ *мм* и $M'_2 = -1{,}9$. Из этих данных получим (см. теоретические выводы):

$$a = L_1 - L_2 = 863{,}6 \text{ мм} - 241{,}6 \text{ мм} = 622 \text{ мм},$$
$$a' = L'_2 - L'_1 = 457{,}2 \text{ мм} - 196{,}6 \text{ мм} = 260{,}6 \text{ мм},$$
$$M'_1 = -0{,}22, \quad M'_2 = -1{,}9.$$

Из уравнения (6) получим:

$$f' = -\frac{a'}{(M_2' - M_1')} = -\frac{260{,}6}{(-1{,}9 + 0{,}22)} = 155{,}2 \text{ мм},$$

а из уравнения (7):

$$f = \frac{aM_1'M_2'}{M_2' - M_1'} = \frac{622 \cdot (-0{,}22) \cdot (-1{,}9)}{(-1{,}9 + 0{,}22)} = -154{,}7 \text{ мм}.$$

Таким образом оба фокусные расстояния численно почти равны между собой, но имеют противоположные знаки; если бы значения обоих фокусных расстояний сильно отличались друг от друга, это означало бы, что при расчетах или при измерении произошла ошибка. То, что в нашем примере фокусные расстояния несколько отличаются друг от друга, об'ясняется тем, что при наличии бывших в нашем распоряжении измерительных средств мы сделали неизбежные ошибки при измерении.

Теперь на основании сделанных измерений определим расстояния фокусных точек от наших меток. Из уравнения (4) находим расстояние второй главной фокусной точки от плоскости $I'$:

$$b'_f = \frac{aM_1'}{M_2' - M_1'} = \frac{260{,}6 \cdot -0{,}22}{-1{,}9 + 0{,}22} = +\ 34{,}0\ \text{мм}.$$

Таким образом $I'$ находится на 34 *мм* правее $F'$; так как $L'_1 = 196{,}6$ *мм*, то $F'$ отстоит на 162,6 *мм* от метки, служащей для измерения $L'_1$. Передняя фокусная точка $F$ получается аналогично из уравнения (5).

$$b_f = -\frac{aM_2'}{M_2' - M_1'} = \frac{-622 \cdot -1{,}9}{-1{,}9 + 0{,}22} = -\,703{,}6\ \text{мм}.$$

следовательно плоскость $I$ расположена на 703,6 *мм* левее $F$; так как $L_1 = 863{,}6$ *мм*, то $F$ отстоит на 160 *мм* влево от нашей метки, предназначенной для отсчетов в пространстве об'екта.

*Простой метод без вычислений*. Начинаем с того, что определяем длину $F'$ резкой фокусировкой очень удаленных об'ектов. При этом в случае примененного выше об'ектива для расстояния от $F'$ до прежней определяющей пространство изображения метки получается 162,6 *мм*. Затем отыскиваем расстояние $L$ до об'екта (от метки для отсчетов в пространстве об'екта), при котором получается резкое обращенное изображение в натуральнух величину ($M' = -1$), и измеряем также получающееся расстояние $L'$ матового стекла от метки для пространства изображения. Опыт, поставленный с нашей линзой, дал $L = 315$ *мм*, $L' = 317{,}5$ *мм*. Так как $M' = -1$, то согласно уравнению (8) получается $x'_f = -f' \,.\, M' = f' \,.\, -1 = f'$. Величина $f'$ представляет собой расстояние, на которое надо растянуть мех камеры, чтобы матовое стекло из положения резкой установки «на бесконечность» переместилось в положение резкой установки для изображения в натуральную величину. В рассматриваемом нами случае для этой величины получается 317,2 *мм* — 162,6 *мм* = 154,9 *мм*. Принимая, что $f$ и $f'$ численно равны между собой, мы можем также установить положение передней фокусной точки. Она должна находиться на расстоянии одного фокуса от плоскости об'екта, изображающегося в натуральную величину. Расстояние упомянутой плоскости об'екта равнялось 315 *мм*, поэтому передняя фокусная точка должна лежать на 160,1 *мм* влево от нашей метки.

Эквивалентное фокусное расстояние таким путем нельзя определить с точностью, большей 0,1%. Положение главных фокусных точек определяется с точностью не более 0,02 *мм;* это об'ясняется тем, что положение «резкого» изображения нельзя получить с абсолютной точностью, так как в каждом фотографическом об'ективе ошибки (аберрации) устранены не до конца, чем и об'ясняется некоторая неточность установки.

*Расчет расстояний до предмета и до изображения, необходимых для определенной степени увеличения*. Такой расчет можно провести, исходя из уравнения (8), дающего расстояние об'екта от $F$ и расстояние изображения от $F'$ для заданного увеличения и при

известном фокусном расстоянии. Если мы хотим определить требуемые расстояния от принятых меток, то достаточно подставить в уравнение экспериментально найденные постоянные величины: $f' = 155{,}2$ *мм*; $Lf$ (расстояние от передней фокусной точки до метки для пространства об'екта) $= 160{,}1$ *мм*; $L'_f$ (расстояние задней фокусной точки от принятой метки пространства изображения) $= 162{,}6$ *мм*. Откуда $L$, т. е. расстояние об'екта от метки пространства об'екта для желаемого увеличения $M'$, получается равным:

$$L = L_f + \frac{f'}{M'};$$

с другой стороны, расстояние от матового стекла до метки пространства изображения составляет:

$$L' = L'_f + f' \cdot M'.$$

Следовательно в нашем случае получается:

$$L = 160{,}1 + \frac{155{,}2}{M'},$$

$$L' = 162{,}6 + 155{,}2 \cdot M'.$$

Допустим, что нам требуется получить изображение, имеющее по сравнению с оригиналом $2\frac{1}{2}$-кратное увеличение. Тогда:

$$L = 160{,}1 + \frac{155{,}2}{2{,}5} = 222 \text{ мм},$$

$$L' = 162{,}6 + 155{,}2 \cdot 2{,}5 = 550 \text{ мм}.$$

Если же мы хотим получить изображение, уменьшенное например до одной трети оригинала, то находим:

$$L = 160{,}1 + \frac{155{,}2}{0{,}333} = 625 \text{ мм},$$

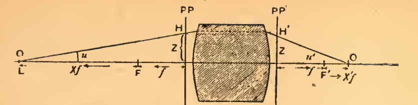
$$L' = 162{,}6 + 0{,}333 \cdot 155{,}2 = 214 \text{ мм}.$$

Если нам нужно изобразить человека, рост которого равен 1,82 *м*, таким образом, чтобы его изображение имело в высоту 10,0 *см*, то сперва вычисляем

$$M' = \frac{10{,}0 \text{ см}}{182 \text{ см}} = 0{,}06, \text{ а затем находим}$$

$$L = 160{,}1 + \frac{155{,}2}{0{,}06} = 2{,}75 \text{ м}.$$

Длина растяжения камеры $L'$ будет не сильно отличаться от длины растяжения при наводке на очень удаленные об'екты. Вообще рекомендуется большие расстояния высчислять, а меньшие находить экспериментально; поэтому при уменьшениях вычисляется расстояние до об'екта, а при увеличениях — расстояние до изображения.




**17.** К выводу условия тангенсов

Фактически достижимая точность при таких расчетах упомянутых расстояний составляет около 0,2%; поэтому при этих расчетах можно с успехом пользоваться счетной линейкой.

## Развитие теории идеальной фотографической системы линз

В предыдущем отделе мы показали, что уравнениями с (1) по (8) полностью исчерпывается теория образования изображения при помощи фотографического об'ектива. Но пока мы не упоминали о главных плоскостях, играющих существенную роль в гауссовской теории. Мы нашли, что наша система линз в состоянии дать любую степень увеличения и что с помощью названных уравнений легко определить положение об'екта и изображения для любого увеличения. Гауссовские главные плоскости — это две сопряженные плоскости, в которых получается увеличение, равное 1, т. е. когда об'ект лежит в одной из этих плоскостей, его изображение во второй плоскости будет прямым и иметь натуральную величину. Положение этих плоскостей определяется нижеследующими уравнениями:

$$x'_f = \frac{M'a'}{M_2' - M_1'} \quad \text{и} \quad x_f = \frac{-a\ M_1'M_2'}{M'(M_2' - M_1')}\ ;$$

если $M'$ в частном случае придадим значение $+1$, то получится, что $x'_f = -f'$, а $x_f = -f$ (согласно нашим прежним уравнениям (6) и (7)). Полученные для специального случая значения $x'_f$ и $x_f$ измерены от фокусных точек до главных плоскостей, обычно же принято измерять гауссовские эквивалентные фокусные расстояния в противоположных направлениях; из этого явствует, что мы были совершенно правы, определяя (из уравнений 6 и 7 для $f$, $f'$ не только величину, но и знак.

Главные плоскости, определяемые нами как сопряженные плоскости с увеличением, равным 1, позволяют сделать дальнейшие очень важные выводы. На рис. 17 $O$ — точка об'екта, находящаяся на оптической оси, а $O'$ — соответствующая сопряженная точка изображения; $F$ — передняя фокусная точка, $PP$ — передняя (1-я) главная плоскость; $PP'$ — задняя (2-я) главная плоскость и $F'$ — задняя фокусная точка. Луч, выходящий из $O$ под углом $u$ (к оптической оси), пройдет через сопряженную точку изображения $O'$ под углом $u'$. Входящий луч встречает переднюю (1-ю) главную плоскость в точке $H$, лежащей на расстоянии $Z$ от оптической оси.

Если рассматривать этот луч как выходящий из точки $H$, то вторую главную плоскость $PP'$ он должен пересечь в точке $H'$, тоже лежащей на расстоянии $Z$ от оптической оси, так как увеличение в обеих сопряженных главных плоскостях равно 1. Между углами $u$ и $u'$ существует следующая зависимость:

$$\operatorname{tg} u = \frac{Z}{f - x_f} \text{ и } \operatorname{tg} u' = \frac{Z}{f' + x'_f};$$

разделив оба уравнения друг на друга, получим:

$$\frac{\operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} u'} = \frac{f' + x'f}{f + x_f}.$$

Если увеличение, с которым $O$ изобразится в $O'$, обозначим через $M'$, то согласно уравнению (8) имеем:

$$x'_f = -f M' \text{ и } x_f = -\frac{f}{M'};$$

введя эти значения в верхнее уравнение, получим

$$\frac{\operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} u'} = \frac{f'(1 - M')}{f\left(1 - \frac{1}{M'}\right)} = \frac{f'}{f} M'. \qquad 9$$

Далее необходимо указать на одно из важнейших положений геометрической оптики, которое мы не можем здесь выводить ввиду сложной связи его как с теорией ошибок изображения, так и с волновой теорией света. Поэтому примем это положение, называемое условием синусов, как доказанное (по этому вопросу см. Czapski, Grundzüge der Theorie der optichen Instrumentenach Abbe. 3. Aufl. Leipzig. Toh. Amb. Barts, 1924). Это положение гласит: система линз (всегда указывается, какого рода) только тогда свободна от комы (см. ниже), когда выполнено следующее условие:

$$\frac{\sin u}{\sin u'} = \frac{n'}{n} M', \qquad 10$$

где $u$, $u'$ и $M'$ означают то же, что и в прежних уравнениях (уравнение 9);

$n$ — показатель преломления среды на левой стороне;

$n'$ — показатель преломления на правой стороне системы.

Правая часть уравнения (10) является таким образом для данной точки об'екта $O$ константой. Следовательно, с одной стороны, согласно уравнению (10) существует требование, по которому у сопряженных оптических углов отношение синусов должно быть величиной постоянной, а с другой стороны, согласно уравнению (9) постоянной величиной у них должно быть отношение тангенсов. Оба эти условия одновременно выполнимы только в случае, когда $u = u'$, что возможно только для частного случая положения $O$ или $O'$.

Существование обоих названных условий противоречит таким образом требованию, чтобы система линз давала идеальное (безуко-

ризненное) изображение при всех возможных расстояниях до об'екта.

С одной стороны, мы имеем условие синусов в качестве непреложного закона геометрической оптики, а с другой — условие тангенсов, являющееся логическим следствием нашего допущения, что система линз должна изображать совершенно точно об'екты на двух различных расстояниях. Из этого нам приходится сделать вывод, что наше последнее допущение неправильно (действительно наше допущение ни разу не подтвердилось вполне при точной экспериментальной проверке для данной системы линз), и потому система, соответствующая нашему строгому определению, не может существовать. Теперь перейдем к дальнейшим выводам.

1. Противоречие между уравнениями (9) и (19) получилось из-за нашего требования, чтобы система давала свободные от ошибок изображения для двух различных расстояний. У нас нет никакого повода отрицать возможность безукоризненно точного изображения для одного какого-нибудь расстояния, при этом необходимо указать на то, что наиболее интересующие нас фотографические об'ективы применяются главным образом для с'емки сравнительно далеко отстоящих об'ектов, таким образом изображения образуются преимущественно в главной плоскости и в непосредственной близости от нее.

2. Исследование параллельных рядов значений синусов и тангенсов в таблице натуральных гониометрических функций показывает, что синус мало отличается по величине от тангенса при малых углах; при 4° они отличаются приблизительно на ¼%. Если же учесть, что резкость, требующаяся от фотографических снимков, по сравнению с резкостью микрофотографий и изображений, даваемых зрительными трубами, мала, то можно утверждать, что противоречие между нашими уравнениями (9) и (10) должно быть сравнительно не велико, пока углы $u$ и $u'$ меньше 4°. Такие углы $u'$ получаются в плоскости фокуса (со стороны изображения) у фотографических об'ективов с относительным отверстием 1 : 7 и фокусным расстоянием свыше 100 *см*. Относительное отверстие 1 : 7 является обычным для нормальных универсальных об'ективов.

Для названных углов отношение синусов и тангенсов можно принять почти одинаковым и, исходя из этого, считать равными правые части наших уравнений (9) и (10). Тогда получается следующая зависимость:

$$-\frac{f'}{f} M' = \frac{n'}{n} M',$$

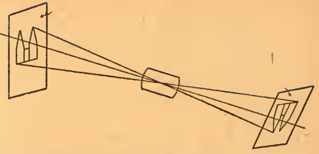
следовательно:

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}.$$

В фотографических об'ективах по обе стороны имеем воздух, т. е. $n = n'$,

поэтому:

$$f = -f' \qquad 11$$



**18.** Изображение наклонных плоскостей

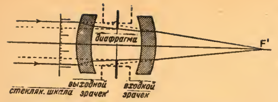
Таким образом переднее и заднее эквивалентные фокусные расстояния имеют одинаковую численную величину, но разные знаки, что соответствует выводам, сделанным в предыдущем отделе.

## Изображение наклонных плоскостей

До сих пор наше исследование ограничивалось допущением перпендикулярности к оптической оси плоскостей об'екта и изображения. Если же мы допустим, что плоскость об'екта $O$ (рис. 15) наклонена к оптической оси под углом $\Sigma$ то (распространяя на такой случай указанный выше метод) можно доказать, что эта плоскость изобразится в наклонной плоскости изображения. Отсюда следует, что в фотографическом смысле система линз будет давать п л о с к о е изображение п л о с к о г о об'екта, как бы сильно последний ни был наклонен к оптической оси, и это положение остается в силе даже в том случае, когда об'ект расположен параллельно оптической оси. В камерах хорошей конструкции, учитывая это, делают переднюю и заднюю часть камеры способной принимать наклонное положение. Ввиду того, что прямую линию можно рассматривать как место взаимного пересечения двух плоскостей, то можно считать, что прямая линия в любом положении будет изображена прямой линией. Если например в охватываемом об'ективом поле зрения проходит в каком-нибудь направлении телеграфная проволока, то она может быть из конца в конец резко изображена при соответствующем наклонении подвижной передней и задней части камеры.

Здесь следует заметить следующее: когда плоскости об'екта и изображения обе перпендикулярны к оси, то, как мы нашли раньше, изображение вполне подобно об'екту. Если же плоскость об'екта перпендикулярна, а плоскость изображения наклонна к оси, то подобия больше не наблюдается. В таком случае получается перспектива, как при косом рассматривании фронтона здания, выражающаяся между прочим в том, что горизонтально идущие линии сближаются в направлении точки схождения.

Ранее упомянутые свойства идеальных линз можно использовать следующим образом: часто приходится фотографировать высокий дом или крутую гору, требующие слишком большого для обыкновенной камеры угла изображения, и в то же время жела-




**19.** Определение оптически действующего отверстия диафрагмы

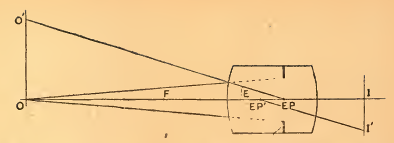
тельно сохранить обычное при с'емке вертикальное положение пластинки. В этом случае следует наклонить камеру, не обращая внимания на получающуюся перспективу. При увеличении изображения можно вновь восстановить правильную перспективу приемом, показанным на рис. 18. Для этого нужно только заметить угол наклона камеры или, вернее, пластинки при с'емке, а также длину фокуса примененного об'ектива. Если поместить негатив и бумагу, на которой предстоит сделать увеличение, под правильным ранее отмеченным углом друг к другу и взять проекционный об'ектив с надлежащим фокусным расстоянием (негатив помещается на таком же расстоянии от проекционного об'ектива, на каком при с'емке он находился от об'ектива камеры), то получится резкое изображение с правильной, нормальной перспективой.

На практике не столь существенно точное соблюдение расстояния от об'ектива до негатива. Если мы правильно установили угол наклона, то в случае например, снимка здания, упомянутого нами выше, линии, которые должны получиться параллельными, и на экране для увеличения тоже получатся параллельными. При точном соблюдении всех условий получается изображение, которое нельзя отличить от изображения, полученного широкоугольным об'ективом при вертикально установленной пластинке.

Теперь, после всего изложенного, мы достаточно подготовлены для обсуждения целого ряда важных свойств фотографических об'ективов.

## Светосила фотографических об'ективов—яркость изображения

Фотографические об'ективы должны иметь конечное отверстие; с помощью диафрагм можно уменьшать по желанию величину этого отверстия. Обычно диафрагмы помещаются между линзами таким образом, что они видны с обеих сторон системы. Однако видна не самая материальная диафрагма, а ее изображения, представляющие входной и выходной зрачки: в х о д н о й з р а ч о к — это изображение диафрагмы, видимое со стороны об'екта, а в ы х о д н о й з р а ч о к — изображение, видимое с другой стороны. Рис. 19 показывает, что пучок световых лучей от предмета, находящегося на нормальном расстоянии, ограничивается входным зрачком. Кроме того из рис. 19 ясно, что в случае помещения диафрагмы в п е р е д и передней линзы пучок лучей света, стремящийся войти в систему, суживается. Ясно, что мы впали бы в ошибку, определяя отверстие об'ектива диаметром материальной диафрагмы. Правильное значение получится при определении диаметра входного зрачка, что можно сделать сле-




**20. Вычисление освещения (яркости) фотографического изображения.** *EP*—**входной зрачок**

дующим образом: помещаем глаз в задней фокусной точке $F'$ (где мы можем укрепить кусок картона с маленьким отверстием) и просчитываем величину отверстия системы по стеклянной шкале, прижимаемой вплотную к переднему краю оправы об'ектива и освещаемой сзади. Входной зрачок, иначе называемый оптически действующим отверстием об'ектива, всегда больше материального отверстия диафрагмы; величина первого превосходит последнее приблизительно на 20% (в среднем).

Необходимо отметить, что входной зрачок имеет очень большое значение для перспективы фотографических изображений. Если представим себе, что материальная диафрагма уменьшена до очень малого диаметра (почти точечного), то и входной зрачок сократится почти до размеров точки, причем ее положение относительно поверхности первой линзы остается приблизительно неизменным. Центр входного зрачка является точкой зрачка перспективного изображения и потому определяет последнее. Перспектива полученного изображения соответствует переспективе изображения, полученного при помощи стенопа, при этом отверстие стенопа совпадает с центром входного зрачка. Точное определение положения входного зрачка при некоторых обстоятельствах может иметь большое значение для фотографических измерительных целей.

Яркость спроектированных фотографическим об'ективом изображений можно определять следующим образом.

На рис. 20 в точке $O$ помещен маленький об'ект, посылающий свет в находящуюся вправо от него систему линз. Если рассматривать об'ект как самостоятельно светящееся тело, то для наших рассуждений можно привлечь основные законы фотометрии. Освещение в плоскости входного зрачка обратно пропорционально квадрату расстояния между об'ектом и входным зрачком. Это расстояние мы мыслим себе составленным следующим образом.
1. Расстояние об'екта от передней фокусной точки, которое соответствует $x_f$ в уравнении (8) ($x_f = \frac{f}{M'}$,

где $f$ есть эквивалентное фокусное расстояние, а $M'$ — получающееся при данном положении об'екта увеличение).
2. Расстояние передней фокусной точки $F$ от входного зрачка $EP$.

Так как входной зрачок всегда помещается недалеко от первой главной плоскости, то второе расстояние можно выразить через

$$f(1+p),$$

где $p$ есть небольшая дробь (положительная или отрицательная). Поэтому мы можем сказать, что освещение единицы поверхности входного зрачка обратно пропорционально:

$$f^2\left([1+p]-\frac{1}{M'}\right)^2.$$

Ясно, что входной зрачок может пропустить через систему только такое количество света, которое пропорционально площади входного зрачка $A^2$, если диаметр последнего обозначить через $A$. Это количество света пропорционально:

$$\frac{A^2}{f^2\left([1+p]-\frac{1}{M'}\right)^2}.$$

Воспринятое количество света, пройдя систему линз, суммируется в изображении $I$, сопряженном с об'ектом $O$. Линейная величина этого изображения пропорциональна увеличению $M'$, ввиду чего поверхность изображения должна быть пропорциональна $M'^2$. Поэтому освещенность изображения обратно пропорциональна $M'^2$ и прямо пропорциональна ранее найденному количеству света, воспринятому входным зрачком. Если теперь через $k$ обозначим некоторую численную константу, зависящую от примененных единиц измерения, которой мы пока не дали еще никакого определения, то мы в состоянии составить уравнение, по которому яркость изображения, обозначаемая нами через $H$, равна:

$$H=k\frac{A^2}{f^2\left([1+p]-\frac{1}{M'}\right)^2\cdot M'^2}=k\frac{A^2}{f^2[M'(1+p)-1]^2}$$

Для очень удаленных об'ектов $M'$ представляет очень небольшую величину и потому ею можно пренебречь. В этом случае уравнение приобретает следующий вид:

$$H=k\frac{A^2}{f^2},$$

означающий, что яркость изображения пропорциональна квадрату относительного отверстия.

В практике фотографии в первую очередь нас интересует продолжительность экспозиции, необходимая для достижения нужной степени почернения негативного изображения. Согласно известному и экспериментально точно установленному закону продолжительность экспозиции обратно пропорциональна яркости изображения, т. е. освещенности пластинки, поэтому можно написать, что продолжительность экспозиции равна:

$$t\cdot\frac{f^2}{A^2}[M'(1+p)-1]^2,$$

где $t$ означает константу, получаемую экспериментально и зависящую между прочим от чувствительности применяемого негативного материала. Встречающаяся в этой формуле обратная величина относительного отверстия $\frac{f}{A}$, выгравирована для отдельных отверстий диафрагмы либо на оправе диафрагмы, либо на самих диафрагмах (по Ватергоузу). Нормальная последовательность значений $\frac{f}{A}$ будет: 4; 5,6; 8; 11,3 и т. д. Такое соотношение выбрано потому, что квадраты этих чисел, которым пропорциональна продолжительность экспозиций, относятся как 1 : 2 : 4 : 8 и т. д., что значительно проще для расчета экспозиции.

Последний множитель в только что приведенном нами уравнении имеет значение только при с'емке об'ектов, находящихся на небольшом расстоянии, ввиду чего в этих случаях он может быть заменен выражением $(M+1)^2$, где $M$ есть численное значение увеличения без учета знака. Это приводит к простому правилу, что для установления продолжительности экспозиции при фотографировании близких об'ектов достаточно число, определяющее диафрагму, т. е. значение величины $\frac{f}{A}$, помножить на $(M+1)$.

Если нужно например получить линейное уменьшение плоского изображения вдвое, т. е. $M=\frac{1}{2}$ и, применяя диафрагму 8, т. е. $\frac{f}{A}=8$, мы должны выбрать такую продолжительность экспозиции, как для с'емки с большого расстояния с диафрагмой $\frac{8}{1}+\frac{1}{2}=12$, т. е. $\frac{f}{A}=12$. Если хотим втрое увеличить оригинал, то множитель $(M+1)$ будет равен 4 и при диафрагме 8, т. е. при $\frac{f}{A}=8$, должна быть выбрана такая продолжительность экспозиции, как будто производится с'емка с диафрагмой 32, т. е. $\frac{f}{A}=32$. В об'ективах некоторых типов множитель $(1+p)$ может играть заметную роль. В ландшафтной линзе с передней диафрагмой $p$ есть отрицательная дробь, в то время как например у Бистеляра Буша $p$ — положительная величина. В первом случае при учете этого фактора для близких предметов получается сокращение, а во втором увеличение продолжительности экспозиции по сравнению с вычисленным только при помощи множителя $(M+1)$.

Формулы, выведенные выше, вполне правильны и безошибочны для об'ектов, расположенных вблизи оптической оси (т. е. для центра поля зрения). Если же об'ект занимает большое поле зрения, то изображение его наружных участков будет менее ярко,

чем изображение центрально расположенных участков. Такая разница в освещении поверхности пластинки в случае больших углов изображения может стать отчетливо заметной (рис. 20). Сначала принимаем, что полное отверстие входного зрачка остается таким же и для косого пучка. Ясно, что об'ект $O^1$, имеющий одинаковую с центрально расположенным об'ектом $O$ яркость, виден из входного зрачка под углом $E$ и лежит следовательно дальше от входного зрачка; разница расстояний до обоих об'ектов растет с секансом угла $E$. Согласно основным законам фотометрии, освещенность входного зрачка, обусловленая об'ектом $O^1$, будет меньше, а именно: она будет пропорциональна $\cos^2 E$.

Далее, диаметр входного зрачка при рассматривании его из точки $O^1$ кажется укороченным, а именно пропорционально $\cos E$, вследствие чего и поверхность входного зрачка кажется уменьшенной. И наконец при рассматривании малого об'екта $O^1$ из входного зрачка об'ект кажется укороченным тоже пропорционально $\cos E$; таким образом освещенность в $I'$ изображения об'екта $O^1$ будет меньше, чем освещенность в $I$, пропорционально $\cos^4 E$; в соответствии с этим продолжительность экспозиции для $I'$ должна возрастать с $\sec^4 E$, чтобы вызвать такой же эффект почернения, как и в случае $I$. Факторы $\cos^4 E$ и $\sec^4 E$ возрастают очень быстро, что видно из следующей таблицы:

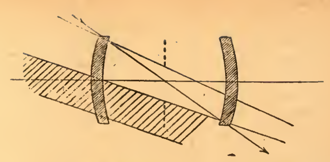
| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $E =$ | $10^0$ | $20^0$ | $30^0$ | $35^0$ | $40^0$ | $45^0$ |
| $\cos^4 E =$ | 0,94 | 0,78 | 0,56 | 0,45 | 0,34 | 0,25 |
| $\sec^4 E =$ | 1,06 | 1,28 | 1,78 | 2,22 | 2,91 | 4,00 |

Так как у об'ективов с малым углом поля зрения $E = 20°$, то у таких об'ектов изображения на краях показывают уменьшение освещенности на 22% по сравнению с серединой; при $E$, равном 30°, это уменьшение доходит почти до 50%, а при $E$, равном 45° (т. е. у широкоугольных об'ективов), — до 75%.

До сих пор мы рассуждали о падении яркости на краю поля зрения только с точки зрения чисто фотометрических законов, теперь же перейдем к перечислению других причин падения яркости.

1. Некоторая часть парающего света отражается от поверхностей, разграничивающих воздух и стекло, и потому не попадает в точку изображения. Потери на отражение при косых пучках в силу большего угла падения значительнее, но они все же не очень портят дело.

2. Линзы, из которых состоит фотографический об'ектив, поглощают часть света и отчасти как раз фотографически наиболее актиничные лучи (тяжелый флинтглас и некоторые новые баритовые стекла обладают довольно сильным поглощением). Если в об'ективе одна из линз сделана из такого сильно поглощающего стекла, то поглощение в косых пучках будет особо ощутимо в том случае, если это вогнутая линза, так как по краям она толще, чем посредине. В этом случае падение яркости довольно сильное. С другой стороны, выпуклая линза, сделанная из сильно поглощающего материала, ослабляет в первую очередь центральные лучи, в результате чего можно добиться выравнивания освещения изображения. Для выравнивания освещения изображения по краям и посредине пытались включать сильно поглощающую вы-



21 Схема, поясияющая сущность виньетирования

пуклую линзу на большом расстоянии от входного зрачка системы, но это средство не оправдало себя, так как оно сильно сокращало светосилу об'ектива.

3. Значительное влияние на правильное распределение освещенности оказывает виньетирование (Abschattung). Виньетирование при угле наклона косых пучков, не доходящем даже до 25°, может в условиях применения устаревших светосильных портретных об'ективов и ректилинеаров свести освещенность до нуля. В современных, более компактно построенных, об'ективах такое положение наступает при угле около 50°.

Виньетирование зависит от ограничения диаметра об'ектива и от расстояния между отдельными линзами, из которых составлена система. Из рис. 21 легко понять, что косой пучок, заполняющий все отверстие передней линзы, падает на заднюю линзу эксцентрично и вследствие ограниченного размера отверстия последней не может быть целиком пропущен. По мере увеличения наклона падающего пучка (на нашем рисунке луч, отмеченный направляющими стрелками, обозначает такой пучок) достигается определенная граница, при которой может пройти только один луч. Даже без особых доказательств ясно, что эфект виньетирования возрастает тем быстрее, чем меньше предельный угол критического луча. Поэтому удобнее, когда угол изображения (поперечник изображения) всей освещенной поверхности возможно больший и когда пластинка не использует его целиком. Фотографический об'ектив с углом изображения в 90° в выше поясненном смысле дает при полном отверстии (современные анастигматы в общем удовлетворяют этому условию) более равномерное распределение яркости на матовом стекле, чем об'ектив с освещенным полем только в 60 или 75°. Диафрагмированием можно совершенно устранить явления виньетирования в средней части поля изображения, но сверх определенного угла оно все же продолжает быть заметным. На основании этого выясняется следующее: об'ектив с относительным отверстием 1 : 6 при диафрагмировании до 1 : 11 дает такое же равномерное освещение изображения, как об'ектив с относительным отверстием 1 : 11 при полном отверстии. На основании сказанного становится ясным, почему хорошо сконструированным широкоугольным об'ективам приданы такие размеры, что фактический диаметр линз значительно превосходит оптически используемый.




**22.** Вывод глубины фокуса фотографического об'ектива

При изготовлении копий с негативов на бромосеребряной бумаге мы располагаем отличным средством компенсировать неустранимую в негативе неравномерность освещения. Этим средством пользуются при получении так называемых «газопечатных» копий. Изображение экспонируется в копировальной рамке с правильно выбранного расстояния сравнительно слабым источником света. При этом те фотометрические законы, которые обусловливают падение света в негативе, используются как компенсирующее средство для выравнивания неравномерной плотности негатива, так как менее плотные, краевые участки негатива воспринимают меньше света, поскольку на них падают косые лучи. При увеличении получается тот же эфект, так как и в этом случае середина негатива сильнее освещается, чем края. Фотометрически обусловленное падение яркости можно компенсировать при копировании и увеличении; с падением яркости из-за виньетирования борются единственно возможным способом: не используют полного отверстия об'ектива.

## Глубина фокуса

При рассмотрении теории идеального об'ектива мы показали, что каждой плоскости об'екта соответствует сопряженная плоскость изображения. В силу этого можно ожидать геометрически резкое изображение только в том случае, когда об'ект лежит в одной плоскости. Но так как большинство об'ектов имеет три измерения, то невозможно резко изобразить их в одной плоскости, каковой являются фотографическая пластинка или матовое стекло. Умелый фотограф выходит из положения таким образом, что, используя подвижность матового стекла и об'ектива, он делает наводку на плоскость, лежащую внутри снимаемого об'екта. Все важные точки об'екта должны быть при этом расположены по соседству с этой плоскостью, чтобы весь об'ект изобразился с достаточной резкостью (здесь многое зависит также от правильного выбора места, с которого производится с'емка). Если же возможности при с'емке ограничены, то упомянутые приемы практически неприменимы, и тогда приходится диафрагмировать об'ектив, чтобы все детали получить с желаемой степенью резкости.

Если допустить, что система линз, показанная на рис. 22, резко изображает об'ект *O*, то проходящие через точку *I* лучи выполняют двойной конус с вершиной в точке *I*. Пересечение этого конуса со светочувствительной пластинкой, находящейся от *I* на расстоянии *df'*, дает круг с диаметром *D*, пропорциональным расстоянию *df'* и телесному углу светового конуса. Точка *O* изобразится таким образом на пластинке не в виде точки, а в виде круж-

ка рассеяния. Хотя изображение и «размыто», но его нерезкость не будет производить неприятного впечатления до тех пор, пока кружок рассеяния не переходит порога разрешающей, способности глаза. Расстоянием $df'$, которому соответствует такое критическое значение $D$, мы определяем глубину фокуса об'ектива. Предельным значением для $D$ в изображениях, рассматриваемых невооруженным глазом, мы принимаем 0,25 *мм*. Это условие можно допустить для ландштафтных снимков нормального формата. В снимках малого формата и на негативах мы требуем меньшего предельного значения для $D$; в этих случаях $D$ должно быть равно 0,1 *мм*. Если же требуется точечная резкость, то $D$ должно быть равно 0,03 *мм*, причем это значение $D$ следует рассматривать как крайний предел. Последняя величина почти совпадает с расстоянием между зернами эмульсии высокочувствительных пластинок, поэтому нет никакого смысла пред'являть боле высокие требования. Величина $df$, соответствующая выбранному значению $D$, зависит от оптического угла светового конуса, равного очевидно для удаленных об'ектов отношению свободного отверстия к длине фокуса. Получается следующая зависимость: $df' = D$, умноженному на обратную величину относительного отверстия или $df' = D$, умноженному на номер диафрагмы (Blendennummer).

Для сравнительно близких об'ектов, изображаемых с увеличением $M > 1$ (мы считаем здесь $M$ всегда положительным), номер диафрагмы (выгравированный на оправе об'ектива) нужно помножить на $(M + 1)$ (расстояние изображения от главной точки равно $f' + x'f = f' + f'M = f'[1 + M]$); следовательно в этом случае получается, что

$$df = D(M + 1), \qquad 12$$

умноженному на номер диафрагмы.

В нижеследующей таблице сопоставлены значения $df'$, получающиеся при различных значениях обратных величин относительного отверстия и разных предельных значений $D$ для отдаленных об'ективов:

| Предельное значение для Д | 0,25 *мм* | 0,1 *мм* | около 0,03 *мм* |
|---|---|---|---|
| df' при f/4 | 1,0 | 0,4 | 0,1 |
| df' „ f/8 | 2,0 | 0,4 | 0,2 |
| df' „ f/16 | 4,0 | 1,6 | 0,4 |
| df' „ f/32 | 8,0 | 3,2 | 0,8 |

Изложенное позволяет сделать практически важный вывод: глубина фокуса пропорциональна номеру диафрагмы и диафрагмированием можно глубину довести до требуемой величины. Этот способ применим в тех случаях, когда можно допустить уменьшение яркости изображения. Имеется однако предел диафрагмирования, после которого резко наведенные точки начинают терять резкость из-за появляющейся дифракции.

Так как длина волны света имеет конечную величину, оптическая система не может передать точку об'екта в виде абсолютно рез-

кой точки изображения — всегда изображение будет световым кружком, окруженным кольцами света очень малой интенсивности. Диаметр дифракционного кружка пропорционален номеру диафрагмы или обратно пропорционален относительному отверстию. Распределение света в таком кружке изображения можно определить теоретически с помощью интегрального исчисления или же экспериментальным путем.

Диаметр кружка изображения (вернее его наиболее яркой части) по волновой теории света определяется следующей формулой.

Диаметр светового кружка в миллиметрах равен произведению 0,0005 на номер диафрагмы.

Если ввести три определенные значения для $D$, принятые нами выше, и преобразовать эту формулу, то получится, что наивысший, допустимый номер диафрагмы равен $\frac{D}{0,005}$ что приводит к следующему сопоставлению:

| | | |
|---|---|---|
| $D = 0,25$ *мм* | Наивысший допустимый номер диафрагмы | 500 |
| $D = 0,1$ | " " " " " | 200 |
| $D = 0,03$ | " " " " " | 50 |

Из этого следует, что дифракция может помешать только в случаях, требующих предельной резкости изображения — в микрофотографической с'емке сложными микроскопами: номер диафрагмы (со стороны изображения) редко бывает меньше 200.

Для фотографических ландштафтных снимков и т. д. границу диафрагмирования целесообразнее определять иным способом. Из астрономии известно, что две точки, которые требуется раздельно передать с помощью оптической системы с отверстием $A$, должны быть видны при рассматривании их из места нахождения оптической системы под углом, равным $\frac{115}{A}$ *в мм* дуговых секунд.

Нас вполне удовлетворяет, если мы различаем на фотографическом снимке все детали, видимые глазу с места с'емки. Разрешающая способность глаза соответствует приблизительно 60 дуговым секундам. При подстановке этой величины в наше последнее выражение, получим самое малое, допустимое свободное отверстие об'ектива, равное:

$$\frac{115}{60} = 1,9 \text{ мм}.$$

Редко какие из имеющихся в продаже ирисовых диафрагм могут быть закрыты до диаметра, меньшего 1,9 *мм*, поэтому при обычном фотографировании дифракция почти не может влиять на резкость изображения.

На основании изложенного мы можем рассмотреть теперь проблему глубины фокуса с геометрическо-оптическо йточки зрения. Исследуем, каким расстояниям в пространстве об'екта соответствуют принятые значения глубины фокуса в пространстве изображения. С этой целью используем третье уравнение (8), которое в соединении с уравнением (11) дает следующее:

$$x_f \cdot x'_f = -f^2,$$

где $x_f$ — расстояние об'екта от передней фокусной точки, а $x'_f$ — от задней фокусной точки.

Дифференцируя вышестоящее уравнение по $x_f$ и производя соответствующие превращения, получим:

$$dx_f = \frac{dx'_f f'^2}{x'^2_f};$$

подставив затем первую часть уравнения (8) $x'_f = -f'M'$ будем иметь:

$$dx_f = \frac{bx'_f}{M'^2}.$$

$dx'_f$ можно заменить из уравнения (12 *) через $df$ и в результате рийти к следующему уравнению

$$dx_f = \frac{D \cdot (M+1) \text{ умноженное на номер диафрагмы}}{M^2}, \quad 13$$

где $M$ означает увеличение, взятое как положительное число, $dx_f$ представляет протяженность в глубину пространства об'екта (считая от резко наведенной плоскости об'екта), при которой диаметр кружков рассеяния равен $D$. Ввиду того что пространство об'екта простирается по обе стороны от резко наведенной плоскости об'екта, получаем нижеследующее, практически очень приближенное выражение.

Полная протяженность в глубину пространства об'екта равна:

$$\frac{2\ D\,(M+1), \text{ умноженное на номер диафрагмы}}{M^2}. \quad 13^*$$

*Пример:* 1. Портреты обычно снимаются в $1/_{10}$ натуральной величины, следовательно $M = 0{,}1$. Если мы хотим, чтобы $D$ равнялось 0,1 *мм,* и работаем при относительном отверстии $1/_8$ то полная протяженность в глубину пространства об'екта будет равна:

$$\frac{0{,}2 \times 1{,}1 \times 8}{0{,}1^2} = 176 \text{ мм.}$$

Это расстояние уменьшится, если мы применим большее увеличение или будем работать с большим относительным отверстием, т. е. с меньшим номером диафрагмы. Кроме того даже относительно небольшое смещение об'екта может нарушить резкость изображения.

2. Если нам надо увеличить оригинал какого-нибудь чертежа в шесть раз и мы работаем при относительном отверстии $1/8$ (номер диафрагмы 8), то для резко изображаемой протяженности в глубину получится:

$$\frac{0{,}2 \times 7 \times 8}{36} = 0{,}31 \text{ мм.}$$

Ясно, что в данном случае складка на оргинале может уже повредить резкости изображения.

При сильных микрофотографических увеличениях протяженность в глубину пространства об'екта, еще допускающая резкую наводку, может снизиться до 0,0003 *мм,* хотя относительное отверстие со стороны изображения составляет всего $^1/_{500}$.

3. Для сильно удаленных об'ектов в противоположность примерам 1 и 2 глубина фокуса очень велика. Для этого случая наше дополнительное уравнение (13*) не подходит как слишком неточное. Здесь оказалось практически более удобным следующее: рассчитывают ряд расстояний до об'екта, соответствующих в пределах средней глубины фокуса ряду растяжений меха камеры. В результате этой операции получается шкала фокусировки ручных камер.

Если соответствующим образом видоизменить третью часть формулы (8), то можно записать, что

$$x_f = -\frac{f'^2}{df'}.$$

Здесь $df'$ означает расстояние матового стекла от задней фокусной точки а $x_f$ — расстояние резко сфокусированной плоскости об'екта от передней фокусной точки.

Если рассчитать или измерить расстояния отдельных об'ектов от передней фокусной точки, то можно вычислить, лежит ли соответствующее $df'$ в пределах допустимого. Можно и наоборот, исходя из различных значений $df'$, вычислить соответствующие $x_f$. В соответствии с уравнением (12) $df^1 = D$, умноженному на номер диафрагмы, где $D$ есть ранее принятая наша предельная величина.

4. Для ручной камеры достаточна точность 0,25 *мм* для упомянутой нами шкалы значений $df'$. Допустим, что мы работаем с об'ективом, у которого $f$ равно 150 *мм.* Тогда получим:

$$\frac{150^2}{df'}\ мм.$$

Удобнее рассчитывать расстояния об'екта до задней фокусной точки об'ектива (приблизительно в эту точку проектируется изображение), поэтому соответственно преобразуем формулу.

Расстояние об'екта о т з а д н е й фокусной точки равно:

$$\left(\frac{150^2}{df'} + 300\right)\ мм.$$

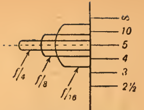
Теперь можно составить следующую таблицу:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Для $df' =$ | 0 | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 *мм* |
| $x_f = \frac{150^2}{df'} =$ | $\infty$ | 9 | 4,5 | 3 | 2,25 | 1,8 *м,* |

а для расстояний от задней фокусной точки соответственно получаются следующие значения:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\infty$ | 9,3 | 4,8 | 3,3 | 2,6 | 2,1 *м,* |

Если $d_f' = 1$ *мм* и мы согласились на резкость изображения при которой $D = 0{,}1$ *мм*, то получается, что нужно работать при номере диафрагмы 10 (относительном отверстии 1:10) для того, чтобы с требуемой резкостью получить протяженность в глубину от $\infty$ до 2,6 *м* (считая от задней фокусной точки). Рассчитанную выше шкалу расстояний можно нанести на откидную доску камеры.




**23.** Шкала фокусировки с указателем глубины фокуса

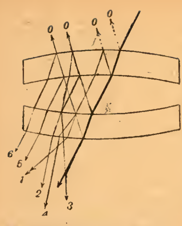
Приспособление, изображенное на рис. 23, представляет комбинацию шкалы фокусировки с указателем глубины фокуса. Справа нанесена шкала фокусировки. Средняя линия указателя устанавливается на желаемое расстояние. Шкала указателя разделена таким образом, что ее деления показывают, какое пространство впереди и позади резко наведенной плоскости при различных величинах относительного отверстия будет изображено с желаемой резкостью; ширина отдельных *U*-образных пластинок зависит конечно от принятой величины *Д*. Третья часть уравнения (8) показывает, что при данной величине *df* значение *xf* пропорционально квадрату фокусного расстояния *f'*; в силу этого для обычных камер подбираются сравнительно короткофокусные об'ективы. Но так как короткофокусный об'ектив дает изображение меньшего формата, то и *D* должно быть выбрано соответственно меньшее для сохранения богатства деталей в изображении. Поэтому фактически *xf* пропорционально просто фокусному расстоянию.

## Рассеянный свет и отраженные изображения в об'ективах

Если фотографический об'ектив настолько хорошо исправлен, что дает резкие изображения с правильной перспективой, то иногда он все же может оказаться непригодным, давая блики из-за рассеянного света, или более или менее резкие отраженные изображения; в результате нарушаются, с одной стороны, правильные световые контрасты изображения, и с другой — искажаются детали изображения.

Рассеянный свет возникает в об'ективе в тех случаях, когда оправа об'ектива и края линз недостаточно или неправильно вычернены. Отраженный от таких мест рассеянный свет, попадая на светочувствительную пластинку, портит так называемую бриллиантность снимка; при полном или почти полном отверстии об'ектива такие явления сказываются очень сильно. Для предотвращения рассеяния света внутри об'ектива металлическая оправа должна быть матово вычернена (одной лакировки недостаточно). О качестве чернения можно судить, рассматривая внутренность об'ектива сбоку (оклеивание бархатом металлических поверхностей, если это только осуществимо, также представляет хороший способ защиты от рассеянного света).

Часто причиной появления «ложного света» (falsches Licht) является отражение падающего света от поверхностей линз, составляю-




**24.** Образование отраженных изображений (Neben bildre)

щих об'ектив. Свет, падая на полированную поверхность, отделяющую стекло от воздуха или воздух от стекла, отражается в количестве от 4,5—6%, и этот отраженный свет может при некоторых обстоятельствах попадать на светочувствительную пластинку. На рис. 24 изображены две отдельные поставленные линзы; изображенный жирной линией луч представляет „полезный" свет. При падении луча на первую поверхность около 5% падающего света отражаются обратно. От второй поверхности снова отражается 5% дошедшего до нее света, причем свет, идущий в обратном направлении, встречая первую поверхность, снова отражается, но на этот раз уже по направлению светочувствительной пластинки и таким путем возникает луч, обозначенный на нашем рисунке цифрой *1*. Аналогичным путем, как видно из рисунка, получается отражение от третьей и четвертой поверхностей (второй линзы) или от первой и второй поверхности, в результате чего получаются лучи, обозначенные цифрами *2*, *3* и т. д. Ясно, что число отражений растет с числом поверхностей, граничащих с воздухом. Существующая здесь зависимость может быть выражена следующим образом.

Если $n$ — число несклеенных линз, то число поверхностей — стекло-воздух будет равно $2n$ и потому

$(2n-1)+(2n-2)+\ldots\ldots 1=n\ (2n-1)$ двойных отражений.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| *Примеры.* Число несклеенных линз | 1 | 2 | 3 | 4. |
| Число двойных отражений | 1 | 6 | 15 | 28. |

Так как поверхности склейки отражают очень слабо, то отражение от таких поверхностей можно совершенно не принимать во внимание.

Так как при каждом двойном отражении ¼% первоначально упавшего света обратно отражается на светочувствительную пластинку, то с числом двойных отражений возрастает интенсивность этого обратно отраженного света.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Число несклеенных линз | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Интенсивность обратно отраженного света в процентах к подающему свету | 1/4 | 1 1/2 | 3 3/4 | 7 |

Претерпевшие двойное отражение лучи дают изображение об'екта, находящегося перед об'ективом. Множество этих изображений находится внутри об'ектива или в непосредственной близости от него и потому не попадает на светочувствительную пластинку, в виду чего эти изображения на пластинке образуют только различной величины круги рассеяния, освещающие теневые участки изображения и вызывающие образование осадка серебра там, где его не должно было бы быть. В связи с этим получающиеся ре-




**25.** Образование блика от диафрагмы: *a* — диафрагма, *b* — увеличенное изображение диафрагмы

зультаты давали бы повод заподозрить передержку, если бы этому не противоречила малая плотность участков ярких светов в бедность деталями теневых участков.

Это неприятное явление можно ослабить, уменьшая отверстие оптической системы, тогда нежелательные лучи отчасти будут исключены. Описанные отражения становятся особенно неприятными, когда обусловленные ими изображения оказываются близко к светочувствительной пластинке — тогда образуются более или менее резкие отраженные изображения (Neben bilder) ярких об'ектов. Если например фотографировать, находясь внутри темного помещения, то в результате таких двойных отражений на полу или на стенах могут оказаться изображения окон.

Другое явление такого же рода так называемый «блик от диафрагмы» (Blendenfleck), который особенно часто встречается в случае применения ландшафтных линз с передней диафрагмой. Выше было указано, что об'ектив дает изображение всех предметов, в том числе и находящихся внутри системы. Образование последнего изображения идет за счет не только преломления, а одновременно и преломления и отражения. Упомянутый выше «блик от диафрагмы» есть изображение диафрагмы. Его образование пояснено на рис. 25. Такое изображение может образоваться вблизи светочувствительной пластинки и иметь значительную яркость, так как при его возникновении участвует полное отверстие об'ектива. На негативе появляется более или менее резко ограниченный темный круг, который на позитиве окажется белым. Явление это заметнее, когда отверстие диафрагмы относительно мало. С ним борются тем, что меняют положение диафрагмы, в результате чего однако может усилиться искривление поверхности изображения и пострадать резкость. Поэтому в некоторых случаях лучше предпочесть несколько большее отверстие диафрагмы.

С изложенными причинами так называемого ложного света можно практически бороться следующим приемом: перед об'ективом помещается вычерненная внутри труба, пропускающая в об'ектив только те лучи, которые дают основное изображение. Такое приспособление особенно полезно в телеоб'ективах.

## Ошибки фотографических об'ективов (аберрации)

Современные анастигматические об'ективы с относительным отверстием, начиная с 1 : 6 и ниже, в качественном отношении настоль-

ко приближаются к идеальной оптической системе, что остающимися в них ошибками можно совершенно пренебречь при обычных фотографических работах. Названные об'ективы с достаточной степенью точности удовлетворяют перечисленным нами выше требованиям.

С другими об'ективами дело обстоит иначе. В старых типах ландшафтных линз и ректилинеаров у очень светосильных анастигматов, а также у об'ективов, применяющихся для репродукционных целей (от которых требуется почти «микроскопическая» резкость и совершенное отсутствие дисторсии), теоретически желаемое совершенство полностью недостижимо. Поэтому безусловно необходимо знать имеющиеся отклонения, учитывать их значение, а также уметь их более тщательно исследовать и количественно определять.

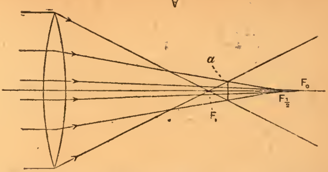
Обычно ошибки (аберрации) системы делят на две группы: 1) ошибки, остающиеся при монохроматическом свете, и 2) ошибки, возникающие при белом, т. е. многоцветном, свете. Аберрации первой группы называют сферическими аберрациями, второй группы — хроматическими, а иногда хроматическими вариациями сферических аберраций. Ни один из различных встречающихся видов сферических аберраций не может быть полностью устранен в фотографическом об'ективе с большим полем и большим отверстием. Подсчет и подробное физическое испытание показывают, что остатки ошибок в них до некоторой степени имеются. Это обстоятельство необходимо в достаточной мере подчеркнуть, так как в большинстве случаев при изложении этого предмета в литературе ему не уделяется должного внимания, — чаще всего довольствуются «приближенными» теориями.

Переходим к изложению отдельных видов сферической аберрации.

## Сферическое отклонение осевых точек (сферическая абе рация в тесном смысле слова)

Если свет, исходящий из точки об'екта, лежащей на оптической оси, встречает на пути простую собирательную линзу, то преломляются в общую точку изображения только те лучи, которые идут в приосевом пространстве, т. е. совсем близко от оптической оси. Лучи, проходящие через периферические части, или «зоны», линзы, после преломления собираются в одну точку изображения лежащую ближе к линзе. Таким путем создается как бы «переплетение» лучей. На рис. 26 видно, что приосевые лучи пересекаются в фокусе $F_0$, в то время как красные лучи пересекут ось в точке $F_1$. Отрезок $F_0F_1$ называется продольным сферическим отклонением линзы.

В первом приближении эта аберрация растет с квадратом отверстия линзы. Поэтому лучи, падающие до половины поперечника полного отверстия, встречаются в фокусной точке $F_{1/2}$, для которой справедлива следующая зависимость: $F_{1/2}F_0 = 1/4 \, F_1F_0$. На основании этого, только приближенно верного закона можно заклю-



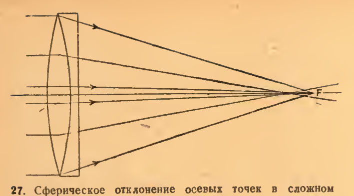

**26.** Сферическое отклонение осевых точек у собирательной линзы: $a$—кружок рассеяния

чить, что наибольшее сужение нашего пучка лучей должно лежать там, где лучи, выходящие из точки $F_1$ расходящимся пучком, пересекаются с преломленными лучами, упавшими на половине высоты отверстия, т. е. сходящимися в точке $F^1/_2$. Из этого следует, что так называемый «кружок рассеяния», возникающий в месте наибольшей перетяжки и имеющий очень большое значение при измерении сферического отклонения (в более узком смысле слова), должен расти с кубом отверстия. Поэтому при задиафрагмировании линзы наполовину диаметр этого кружка рассеяния уменьшится до $1/8$ его наибольшей величины. Последнее об'ясняет, каким образом удается получать чрезвычайно резкие фотографии при помощи об'ективов, у которых осевая сферическая аберрация не может быть уничтожена до конца без того, чтобы одновременно не возникли очень ощутимые внеосевые сферические аберрации.

Положение видимого изображения (самого малого кружка рассеяния) меняется при изменении отверстия линзы. Поэтому наводку на резкость (фокусировку) необходимо производить при том же отверстии, при котором будет произведена экспозиция, что можно в особенности рекомендовать в тех случаях, когда об'ект достаточно ярко освещен.

В сложных об'ективах осевое сферическое отклонение удается устранить тем, что приосевые и самые крайние лучи соединяются в общей фокусной точке ($F$ на рис. 27). Если бы налицо было только осевое сферическое отклонение первого порядка, растущее с квадратом диаметра отверстия, то исправленная система была бы свободна от осевой сферической аберрации. В действительности же встречаются также сферические продольные аберрации высшего порядка, растущие с четвертой или более высокими степенями диаметра отверстия и следовательно могущие оказывать очень сильное влияние.

Так как члены ряда степеней, которыми представлена осевая сферическая аберрация, следуют различным законам и поэтому исчезают для средних зон неодновременно, то возникает продольная аберрация, достигающая своего максимума при падении лучей до 0,7071 высоты полного отверстия. Это означает, что фокусная точка лучей промежуточных зон лежит ближе к линзе, чем фокус-




**27.** Сферическое отклонение осевых точек в сложном об'ективе

ная точка приосевых и самых крайних лучей. В этом случае тоже образуется кружок рассеяния, предельная величина которого при наибольшем отверстии определяет сферически исправленный светосильный фотографический об'ектив.

Величину оставшейся неисправленной осевой сферической аберрации можно проще всего прямо определить, измерив диаметр яркого кружка, представляющего собой изображение светящейся точки; полученную таким путем величину сравнивают с величиной допустимого диаметра кружка рассеяния, который для обычных фотографических снимков составляет около 0,1 *мм.*

При фактическом измерении величина этого яркого кружка у хороших об'ективов значительно меньше ожидаемой согласно геометрическому рассуждению. Далее оказывается, что наиболее яркое и резкое, визуально наведенное изображение лежит не в том точно месте, где можно было бы ожидать местонахождение кружка рассеяния наименьшего диаметра. Отклонения об'ясняются наличием интерференционных явлений.

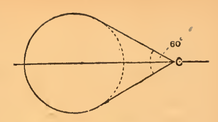
Сферические аберрации в отношении внеосевых точек изображения гораздо более сложны. У Жозефа Петцваля, конструктора, названного его именем, портретного об'ектива, уже в 1840 г. была готова полная теория этих отклонений (в первом и во втором приближении, т. е. с учетом только членов первого и второго порядка ее выражения). Но он не опубликовал ни своих расчетов, ни выведенных им формул. Очень точное представление о сферических отклонениях в косых пучках (отклонения первого порядка) дал астроном Л. Зайдель в 1856 г. Он доказал, что не слишком наклоненные к оптической оси пучки, проходящие через центрированную систему линз, дают 5 (и только 5) следующих различных сферических отклонений первого рода:

1. Обыкновенная сферическая аберрация, аналогичная проявляющейся в осевых пучках.

2. Несимметричная деформация внеосевых точек изображения — к о м а.

3. Симметрично проявляющееся отклонение лучей косого пучка, характеризующееся тем, что вместо одной точки изображения возникают два линейных изображения, или же фокусные линии

на различном расстоянии от об'екта. Эти фокусные линии перпендикулярны друг другу. Внешне по отношению к местонахождению этих фокусных линий вместо точки изображения образуются кружки рассеяния эллиптической формы. Это отклонение называется астигматизмом.
4. Искривление поверхности изображения.
5. Дисторсия.



28. Образование комы

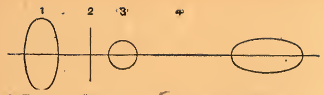
Со времени Зайделя опубликовано очень много исследований и работ по проблеме аберраций. Многие из этих работ расширяют рамки исследований Зайделя в той мере, в какой они сделаны с учетом отклонений высшего порядка. Кроме того некоторые из опубликованных работ трактуют о преломлении косо падающих пучков «несферическими» поверхностями.

В последующем изложении мы будем пользоваться тестоб'ектом, представляющим длинную горизонтальную линию, пересеченную рядом вертикальных прямых, находящихся на равных расстояниях друг от друга. Для этих целей белые линии на темном фоне лучше черных линий на белом фоне. На практике можно например воспользоваться в качестве тестоб'екта белыми нитями, натянутыми на черной стене. Мы принимаем, что оптическая ось нашего об'ектива перпендикулярна к плоскости тестоб'екта и проходит через середину последнего. Изображение тестоб'екта мы наблюдаем на матовом стекле с очень мелким зерном. При испытании симметричного об'ектива, расстояние тестоб'ектива от об'ектива не играет никакой существенной роли, так как эти об'ективы сравнительно не чувствительны к изменениям расстояния. При несимметричных об'ективах (в особенности прежних типов) расстояние тестоб'екта от об'екта должно соответствовать расстоянию, для которого об'ектив преимущественно предназначен, так как несимметричные об'ективы иногда дают очень неудовлетворительные изображения, когда об'ект находится на неподходящем для данной системы расстоянии.

Теперь приступим к описанию видов отклонений (2—5) при косых пучках, ограничиваясь отклонениями первого порядка.

*Кома.* Если имеет место чистая кома, то самое малое геометрической изображение внеосевой точки об'екта принимает характерную форму, изображенную на рис. 28.

Это изображение состоит из круга с двумя примыкающими касательными, пересекающимися под углом приблизительно в 60°. Это пересечение есть вершина комы. Линия симметрии комы пересекает оптическую ось нашей системы линз. Говорят о коме, направленной внутрь, когда точка *C* лежит по направлению оптической оси, и направленной наружу, — в обратном случае. Центральные лучи косого пучка, образующего кому, проходят через точку *C*. Самые крайние лучи проходят через периферию полного круга, а лучи, берущие начало от промежуточных зон




**29.** Поперечный разрез через астигматический пучок

об'ектива, проходят через всю поверхность, ограниченную окружностью с касательными. Вершина комы (место вокруг точки *C*) ярко освещена, а противоположный конец комы имеет очень малую яркость. Линейные размеры комы растут с квадратом отверстия и с расстоянием «точки изображения» от оси. Поэтому кома очень быстро уменьшается с уменьшением отверстия системы — обстоятельство, которое может быть использовано для испытания системы. При наводке на наш тестоб'ект кома скажется в симметричном расширении горизонтальных линий, возрастающем по мере удаления от оптической оси, и в несимметричном расширении вертикальных линий, которые, будучи максимально резко сфокусированы, дают яркую, резкую черту в месте, соответствующем вершине комы, и бледную размытость, соответствующую противоположному концу комы. О степени комы можно судить по величине получающегося при этом расширения.

*Астигматизм.* При наличии астигматизма обнаруживается следующее: изображение внеосевой точки горизонтальной линии нашего тестоб'екта претерпевает очень характерные изменения при незначительном смещении матового стекла. В определенном положении получается эллиптический вертикальный блик с соотношением осей 3 : 1 (рис. 29); при незначительном изменении растяжения меха камеры изображение приобретает форму вертикальной прямой (рис. 29, *2*); при дальнейшем небольшом передвижении матового стекла изображение обращается в небольшой кружок (рис. 29, *3*), диаметр которого вдвое короче вертикальной прямой (фокусной линии) *2*; затем, при дальнейшем смещении матового стекла образуется горизонтальная фокусная линия *4*, такой же длины, как и *2*, и наконец при дальнейшем смещении матового стекла получается фигура горизонтально вытянутого эллипса *5*, размеры которого соответствуют размерам эллипса *1*. Если продолжать передвигать матовое стекло в том же направлении, то поперечное сечение фигуры увеличивается, приближаясь к форме круга. Когда ближе к оптической системе лежит вертикальная фокусная линия, говорят об астигматизме положительном в смысле недоисправления; если же ближе к оптической системе находится горизонтальная фокусная линия, астигматизм называется отрицательным в смысле переисправления. Ясно, что изображение горизонтальной линии нашего тестоб'екта будет вполне резким только при наводке на горизонтальную фокусную линию *4*; по аналогии и вертикальные линии будут резче всего изображаться при фокусировке вертикальной фокусной линии *2*. В положении *3* получается р а в н о м е р н а я нерезкость (размытость) в направлениях обеих прямых, а при всех прочих поло-

жениях матового стекла размытость в направлениях этих двух прямых неравномерная.

Расстояние обеих фокусных линий для данного основного наклона лучей не зависит от величины отверстия, а длина фокусных линий увеличивается с увеличением отверстия. Поэтому недостаточную ясность изображения, обусловленную астигматизмом, можно уменьшить, диафрагмируя отверстие системы. В то время как диафрагмирование на половину полного отверстия уменьшает кружок рассеяния при осевой сферической аберрации до одной восьмой его величины при полном отверстии (кома при тех же условиях уменьшается до ¼), астигматическое расширение точки изображения сокращается в тех же условиях только вдвое. Из этого можно заключить, что при большом отверстии об'ектива астигматизм обусловливает сильнейшие искажения резкости изображения. При рассматривании точек изображения, находящихся на различных расстояниях от оптической оси, обнаруживается следующее: астигматическая разность, т. е. расстояние фокусных линий друг от друга в направлении оптической оси (и зависящая от этого нерезкость изображения), растет с квадратом расстояния точки изображения от оптической оси. Поэтому оптическая система, страдающая сильным астигматизмом и при относительном отверстии 1 : 8 дающая удовлетворительную резкость на поверхности пластинки $9 \times 12$ *см*, при отверстии 1 : 32 будет крыть с достаточной резкостью пластинку $18 \times 24$ *см*. Это обстоятельство об'ясняет почему приходилось так сильно диафрагмировать широкоугольные об'ективы, применявшиеся до введения современных анастигматов.

*Искривление (выпуклость) поверхности изображения.* Выше мы видели, что по причине астигматизма при наводке на горизонтальные и вертикальные линии тестоб'екта мы должны были пользоваться различными плоскостями наводки. Так как расстояние между этими плоскостями растет с квадратом расстояния «точки изображения» от центра поля изображения, то неизбежно возникает искривление поля изображения. Можно вывести следующее правило: изображения вертикальных и горизонтальных линий нашего тестоб'екта расположены соответственно на двух изогнутых поверхностях, соприкасающихся в одной точке, лежащей на оптической оси. Эти плоскости по направлению к краю изображения все больше и больше удаляются друг от друга.

Четвертое условие Зайделя об искривлении поля изображения устанавливает зависимость между этими поверхностями изображения.

Если центрированная оптическая система свободна от астигматизма, то самое резкое изображение плоского об'екта лежит на поверхности (поверхность Петцваля), кривизна которой определяется следующей формулой (называемой уравнением Петцваля):

$$\frac{1}{R'} = -\Sigma \left[ \frac{n' - n}{nn'r} \right].$$

Сумма $\Sigma$ распространяется на все преломляющие поверхности системы; $n$ — показатель преломления среды, лежащей влево, а $n'$ —

среды, лежащей вправо от каждой поверхности, $r$ — означает радиус кривизны отдельных поверхностей и считается положительным, когда центр кривизны лежит вправо от нее. Получающееся из этой формулы $R'$ есть радиус кривизны поверхности изображения применительно к данной астигматической системе линз. Стоящий перед $R'$ знак соответствует данному выше определению для $r$. В приведенном уравнении для $R'$ интересно то, что кривизна поверхности изображения зависит только от отдельных, встречающихся в системе показателей преломления и от отдельных радиусов, но совершенно не зависит от толщины отдельных линз и их расстояния, а также от расстояний до об'екта и до изображения. В системах линз прежних конструкций $R' = -1$ до $-1\frac{1}{2}$ раза больше эквивалентного фокусного расстояния. Таким образом поверхность изображения в случае отсутствия астигматизма была сильно выпукла в сторону наблюдателя (со стороны матового стекла). Большой об'ект поэтому не мог быть целиком фокусирован на одной плоскости. В современных анастигматах (в той мере, в какой они заслуживают это название) $R' =$ около $-4$ до $-20$ раз больше эквивалентного фокусного расстояния, т. е. не менее чем в 3 раза больше по сравнению с прежними системами.

В отделе о сферических отклонениях высших порядков мы увидим, почему $R'$ придается большое отрицательное значение, вместо того, чтобы сделать $R'$ бесконечно большим. Если астигматизм не устранен, то третье и четвертое уравнение Зайделя, взятые вместе, дают очень важную и ценную зависимость. Точка изображения на поверхности Петцваля, размытая из-за астигматизма, всегда имет форму горизонтального эллипса, как в рис. 29 5. Если астигматизм положителен, то кривизна каждой из астигматических поверхностей больше кривизны поверхности Петцваля; поэтому линзы прежнего типа и являются менее пригодными. На практике применялось следующее: умышленно оставляли неисправленным некоторый отрицательный астигматизм, в результате чего астигматические поверхности изображения смещались по другую сторону поверхности Петцваля и изображение таким образом становилось более плоским. Чаще всего применяемый метод исправления ошибок и состоит в том, что изображения вертикальных линий укладывались на плоскости, а изображения горизонтальных линий — на поверхности, кривизна которой составляет две трети кривизны поверхности Петцваля. В некоторых случаях (в частности при широкоугольных об'ективах) поле выравнивалось для «точек изображения», имеющих форму кружков (рис. 29, 3). Тогда обе поверхности изображения как для горизонтальных, так и для вертикальных линий имеют кривизну (первая — положительную, вторая — отрицательную), вдвое меньшую, чем кривизна поверхности Петцваля.

*Дисторсия.* Этот вид аберрации мы уже разобрали при рассмотрении условий правильной перспективы. Остается только добавить, что отклонение точки изображения от должного положения, при котором перспектива была бы безукоризненной, увеличивается с кубом расстояния от центра поля изображения; таким

образом, это отклонение сказывается в особенности на краю поля изображения. Степень дисторсия выражается следующим образом: указывают, сколько процентов составляет отклонение точки изображения (взятой по ее расстоянию от центра поля изображения) от ее должного положения. Дисторсия, выраженная в процентах, возрастает с квадратом расстояния точки изображения от центра поля изображения. Для хороших репродукционных об'ективов дисторсия на краю поля изображения недопустима более 0,1 %; у ландшафтных и портретных об'ективов дисторсия в несколько процентов почти не имеет значения.

В заключение следует добавить, что наши утверждения относительно горизонтальных и вертикальных линий тестоб'екта могут быть применены к любому участку поля зрения, когда говорят о «горизонтальном» (радиальном) и о «вертикальном» (тангенциальном) направлениях,— в обоих случаях относительно середины поля зрения.

## Аберрации высшего порядка в косых пучках

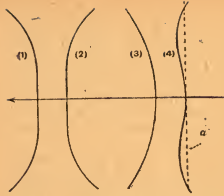
Пять ошибок изображения, установленные Зайделем, могут быть выражены сравнительно простыми формулами, поэтому было бы нетрудно рассчитать системы, исправленные с учетом этих пяти ошибок первого рода. Рассчитанная таким путем система очень приближалась бы к нашей идеальной системе, если можно было бы удовлетвориться относительно малым отверстием и полем зрения не больше 30°. При конструировании тем же путем выступают в значительной мере отклонения высшего порядка, которыми мы до сих пор пренебрегали, и изображение искажается в местах, где эти отклонения достигают значительной величины. Известно девять сферических отклонений второго порядка, неустранимых до конца; их можно компенсировать определенными недоисправленными отклонениями первого порядка. Таким путем опытному расчетчику удается снизить влияние отклонений высшего порядка (почти на одну четверть).

В предыдущем отделе при описании осевой сферической аберрации были указаны компенсационные методы для уменьшения влияния отклонений высшего порядка; теперь перейдем к изложению прочих восьми сферических отклонений второго порядка.

*Кома второго порядка.* Известны три различные типы комы второго порядка.

При наличии первого типа вместо точки изображения получается «блик», сходный с изображенным на рис. 28. В этом случае касательные пересекаются под углом около 83,6°; величина блика растет с четвертой степенью отверстия и прямо пропорциональна его расстоянию от центра поля изображения. Этот тип комы второго порядка может быть уменьшен остатком неисправленной комы первого порядка почти до одной четверти величины по всему полю изображения, так что эта ошибка становится мало ощутимой.

Второй тип комы второго порядка тоже дает картину, изображенную на рис. 28, но в этом случае величина комы растет




**30.** Искривление поля изображения 2-го порядка

с кубом расстояния от оптической оси. Это отклонение при косых пучках устранимо для любой величины отверстия, но только для определенного расстояния от центра поля изображения (оптической оси). Таким образом позонно сохраняется некоторая вариация комы в средних частях поля изображения, лежащих ближе к середине от этой границы, а по направлению к краю кома сильно возрастает. Последнее обстоятельство об'ясняет, почему за пределами определенной границы поля изображения внезапно уменьшается, когда пользуются полным отверстием об'ектива. В некоторых типах об'ективов это явление заметно особенно ясно.

Третий тип комы второго порядка выражается в линейном увеличении фигуры комы, причем на одном конце линии значительнее возрастает яркость; в этом месте лежит фокус центральных лучей пучка. Это отклонение подчиняется тем же законам, что и второй тип комы, но устранить его труднее. Оно во всяком случае не так существенно, как отклонение второго типа.

*Астигматизм второго порядка.* Встречается только одна форма чистого астигматизма второго порядка. Этот вид астигматизма обусловливает в косых пучках ту же последовательность форм поперечного сечения, как и астигматизм первого порядка. Разница заключается только в том, что астигматизм первого порядка, растет с квадратом расстояния от центра поля изображения, а астигматизм второго порядка растет с четвертой степенью упомянутого расстояния и потому может сделаться чрезвычайно сильно заметным.

Эту ошибку системы можно компенсировать для определенного расстояния до центра поля изображения остатком астигматизма первого порядка с обратным знаком. При этом наблюдается позонная вариация астигматизма в центральной части поля изображения, лежащей по направлению к середине от этого предела (в этой части астигматизм имеет знак астигматизма первого порядка), и очень быстрое нарастание его за пределами зоны, для которой исправление сделано. В хороших анастигматах астигматизм второго порядка устраняется почти до края практически используемого поля изображения.

*Искривление поля изображения второго порядка.* Отклонение второго порядка поля изображения от плоскости растет с четвертой степенью расстояния от оптической оси и потому очень заметно на краевых участках поля. Если бы поле изображения не имело совсем кривизны Петцваля, то оно приняло бы форму блюдечка, как это показано на рис. 30 (*1* или *2*). У всех существующих ана-

стигматов поверхность изображения по причине искривления поля изображения второго порядка имеет форму *2* (рис. 30). Отсюда следует, что наибольшее приближение к плоскому полю обеспечено в том случае, когда умеренная кривизна поверхности Петцваля, имеющая форму *3*, выравнивается искривлением поля изображения, имеющим форму *2*, в результате чего получающееся поле изображения имеет форму *4* (рис. 30).

Все это уясняет, почему ни один из существующих типов анастигматов не выполняет в точности условия Петцваля, чтобы R = т. е. $\frac{1}{R} = 0$. Если анастигмат рассчитан хорошо, то отклонение

от условия Петцваля будет иметь в нем такую величину, что будет фактически достигнута очень желательная форма поля изображения, а именно *4* в рис. 30. Как показало тщательное исследование получающегося поля изображения, максимальное отклонение его от идеально плоского поля в данном случае составляет только одну четвертую часть искривления поля изображения второго порядка, возникающего на краях поля. Вопрос о наличии некоторого остатка кривизны Петцваля в новых анастигматах вызывал много споров; анализ это подтверждает, но это не ошибка рассчитывающего, а скорее компромиссный способ, дающий при удачном применении хороший результат. Ясно конечно, что наличие известного остатка кривизны Петцваля в результате должно приводить к ошибке об'ектива, поэтому большой остаток кривизны Петцваля ничего хорошего не может дать. Интересно отметить, что «Гипергон» — Хэга дает хорошее приближение к выполнению условия Петцваля (с отрицательным остатком ошибки), в результате чего получается отличное выравнивание поля изображения и превосходная зарисовка в пределах угла поля зрения около 130°.

Из остающихся неописанными трех аберраций второго порядка две обладают двояким характером. Одна из этих аберраций есть осевая сферическая аберрация второго порядка, растущая с квадратом расстояния точки изображения от оптической оси. Отсюда, с одной стороны, следует уменьшение резкости изображения по причине образования кружка рассеяния, а с другой — оказывается, что внеосевые точки то приближаются, то удаляются от оптической системы при изменении величины отверстия. Так как это изменение положения точек растет с квадратом расстояния изображения от оптической оси, то и кривизна поля увеличивается с расширением отверстия. Этот вид аберрации обычно не достигает значительной величины.

Вторая и более важная аберрация, имеющая двойственный характер, получается в результате взаимного наложения сферической аберрации и астигматизма. В некоторых анастигматах этот вид аберрации может сказываться очень сильно. В результате астигматизма с изменением отверстия расстояния между вертикальной и горизонтальной фокусными линиями сильно изменяется и одновременно падает резкость изображения. Присутствие этого вида аберрации узнается изложенными выше способами; она растет

с кубом отверстия и квадратом расстояния изображения от оптической оси.

*Дисторсия второго порядка.* Сферическое отклонение второго порядка (последнее из наших девяти) обусловливает радиально направленное смещение внеосевых точек изображения пропорционально пятой степени расстояния точки изображения от оптической оси. Эта ошибка обычно невелика. В тех же случаях, когда она достигает необычно больших значений, можно компенсировать ее по краю поля дисторсией первого порядка той же величины, но с обратным знаком. При этом прямые линии, имеющие при обычной бочкообразной или подушкообразной дисторсии форму *3* рис. 30, могут принять форму *4* того же рисунка.

Важно отметить, что оба вида комы, растущие с кубом расстояния от центра поля изображения, имеют в этом отношении тот же характер, что и дисторсия. Если в системе присутствуют эти два вида комы, то дисторсия изменяется с квадратом отверстия системы. Последнее обстоятельство особенно заметно, когда фотографический снимок служит для целей измерения.

В заключение считаем нужным отметить, что и тогда, когда различными способами удается исправить сферические отклонения второго порядка, должно еще остаться 14 отклонений третьего порядка, большей частью имеющих двойственный характер, и связанных с отклонениями второго порядка. Автору пришлось исправлять одно из этих отклонений при расчете широкоугольного об'ектива; оно относилось к числу искривлений поля изображения. Исправление состояло в том, что кривизна поля изображения (рис. 30, *4*), после того как оно пересекло идеально плоское поле, была еще раз обернута, так что в результате получилось «дважды выравненное» поле. (Обычно поле изображения покидает идеальную плоскость изображения после первого пересечения с ней с тем, чтобы больше уже не приближаться к ней).

## Хроматические аберрации

Все свойства линз зависят от показателя преломления стекла, взятого для их изготовления. Из того, что показатель преломления различен для разных цветов, можно заключить, что свойства линз в отношении света различной окраски тоже должны быть неодинаковы.

Описывая свойства идеальной оптической системы, мы показали, что соотношение между об'ектом и его изображением зависит от: а) положения двух главных фокусных точек; б) эквивалентного фокусного расстояния оптической системы.

Соотношения между об'ектом и изображением только тогда будут идентичными для различных цветов, когда фокусные точки и фокусные расстояния будут свободны от хроматических вариаций. Таким образом имеются два основных, взаимно не связанных условия. Отсутствие хроматической вариации главных фокусных точек (в особенности со стороны изображения) называется «ахроматичностью фокуса», или «ахроматичностью пересечения», а отсутствие хроматической вариации фокусных расстоя-

ний — «ахроматичностью фокусного расстояния», или еще лучше «ахроматичностью увеличения», так как последнее определяет, что изображения протяженных об'ектов, образованные различно окрашенными лучами, будут равновелики.

*Продольное хроматическое отклонение.* Простая выпуклая линза собирает синие лучи в фокусной точке, лежащей на меньшем расстоянии от линзы, чем фокусная точка той же точки изображения, образованная красными лучами. Эта последовательность положения окрашенных точек изображения (фокусных точек) характерна для неисправленной собирательной линзы. Когда синяя фокусная точка лежит ближе к системе, чем красная, говорят о хроматически недоисправленной системе; если последовательность положения точек обратная, говорят о хроматически переисправленной системе.

Устранение этого отклонения основывается на открытии, сделанном (около 1758 г.) Доллондом. Так как линзы из флинтгласа имеют относительно бо̀льшую хроматическую аберрацию, чем линзы из кронгласа, то возможно подобрать такую комбинацию двух линз (а именно одну сильную, собирательную, из кронгласа и другую более слабую, рассеивающую, из флинтгласа), чтобы их противоположно направленные хроматические аберрации взаимно уничтожались, и в целом комбинация была ахроматична.

Если в оптической системе сохраняется остаток продольного хроматического отклонения, то в окружности наилучше спроектированной точки изображения получается «переплетение» лучей, от чего при пользовании белым светом должна страдать резкость изображения. В фотографическом отношении очень существенно, совпадает ли фотографически актиничная фокусная точка с визуальной, так как фотографическая пластинка (исключая изохроматических) чувствительна прежде всего к синим и фиолетовым лучам, а человеческий глаз — преимущественно к желтозеленым. Таким образом, если актиничное и визуальное изображения не совпадают, то при визуальной наводке на фокус получается размытый фотографический снимок. В этом случае говорят, что «фотографический об'ектив имеет фокусную разность». Если такая фокусная разность довольно значительна, ее можно обнаружить в камере следующим путем: если какой-либо об'ект был резко сфокусирован на матовом стекле, то в случае хроматической переисправленности об'ектива на негативе будет резко передан более удаленный об'ект; если система хроматически недоисправлена, наблюдается обратное, т. е. на негативе резко передается ближе расположенный об'ект.

*Ахроматичность увеличения.* Фотографические об'ективы, особенно имеющие несимметричное строение, могут передавать различно окрашенные изображения хотя и в одной плоскости, но различными по величине. Это ясно обнаруживается, когда на краях нашего тестоб'екта мы окрасим в разные цвета концы вертикальных линий. Если линии белые на черном фоне и на снимке красный или желтый цвет окрашенных концов сдвинут к середине, а синий — к краю поля, то ясно, что синие изображения будут больше красных. Если линии черные на белом фоне, то

наблюдается обратное. В репродукционных об'ективах (для трехцветной фотографии) даже малая степень такого отклонения производит неприятное впечатление. Расчет таких об'ективов ввиду пред'являемых требований большой ахроматичности увеличения представляет большие трудности.

*Вторичные хроматические отклонения.* Среди хроматических отклонений высшего порядка самое важное — это так называемый спектр второго порядка, обнаруживающийся в обыкновенных ахроматических системах линз. Если получить спектр в одном случае призмой из кронгласа, а в другом — призмой из флинтгласа так, чтобы общая длина спектра в обоих случаях была одинаковой, то окажется, что красная часть спектра от флинтгласа короче, а синяя — длиннее соответствующих частей спектра от кронгласа. Из этого следует, что если мы установим обе призмы друг против друга таким образом, что крайний красный и крайний фиолетовый будут взаимно перекрываться, то посередине сохранится остаток отклонения. Этим обусловлено то, что у ахроматической линзы фокусные точки для средних участков спектра лежат ближе всего к линзе, в то время как фокусные точки для крайних участков спектра наиболее удалены от линзы. Если эту разность выразить в долях среднего фокусного расстояния, то оказывается, что получающиеся разности не зависят от специально примененных типов кронгласа и флинтгласа. Поэтому все обыкновенные ахроматы дают довольно равномерный спектр второго порядка.

Имеются некоторые специальные сорта флинтгласа, с помощью которых явление спектра второго порядка может быть в значительной мере ослаблено. Об'ективы, в которых соответственно использованы такие сорта флинтгласа, называются «апохроматическими». В обыкновенных фотографических об'ективах спектр второго порядка довольно значителен. Обусловленная им фокусная разность между фокусной точкой для яркокрасной линии *C* и фокусной точки для яркосиней линии *F* составляет $^1/_{700}$ эквивалентного фокусного расстояния, т. е. равна почти 0,2 *мм* для об'ектива с фокусным расстоянием в 350 *мм* (причем об'ектив устроен таким образом, что лучи желтой линии *D* собираются в том же фокусе, где собираются лучи темносиней линии *G*). При спектре второго порядка необходимо различно конструировать системы линз применительно к их назначению, т. е. для фотографических целей системы линз должны быть построены иначе, чем для визуальных наблюдений. В настоящее время собственно уже трудно сказать, для каких именно длин волн необходимо исправлять фотографические об'ективы, так как при пользовании изохроматическими пластинками и светофильтрами область фотографической актиничности сильно сближается с областью визуальной чувствительности. Естественно это соотношение иное, если пользоваться обыкновенными несенсибилизированными пластинками и особенно мокрыми коллодионными.

Ввиду того, что явление спектра второго порядка неустранимо, об'ектив с большим фокусным расстоянием, хроматическое исправление которого было рассчитано на дневной свет, дает до-

вольно заметный «химический фокус», если делать им снимки при свете ртутной лампы или вольтовой дуги.

Следующее хроматическое отклонение высшего порядка известно под названием хроматической вариации сферической аберрации; это отклонение бывает очень часто заметно. Если в данной системе линз исправлено в пределах возможного сферическое отклонение в узком смысле слова для одного какого-либо цвета, то, как правило, остается неисправленной сферическая аберрация для остальных цветов. Обычные фотографические об'ективы должны быть исправлены таким образом, чтобы они давали достаточно резкое визуальное изображение. Поэтому должно существовать известное выравнивание между исправлением сферической аберрации для желто-зеленой области спектра, с одной стороны, и синей — с другой. При этом получается следующее: наилучшее исправление сферической аберрации удается для участка спектра, лежащего приблизительно в средней части последнего, к которому мало чувствительны и глаз и обыкновенная сухая пластинка. Вследствие проведенного выравнивания этот участок спектра имеет более короткое фокусное расстояние, чем желто-зеленая и синяя области, имеющие общую фокусную точку. Поэтому как раз изохроматическая пластинка, сенсибилизированная к этой спектральной области, не сможет использовать место наилучшего исправления.

С хроматической вариацией сферической аберрации борются тем, что надлежащим образом подбирают радиусы, образующие систему линз. Гаусс первым занялся этим вопросом, и потому хроматическую вариацию сферической аберрации называют погрешностью против «условия Гаусса». К сожалению оказалось, что соблюдение условия Гаусса связано обычно с возникновением на краю поля изображения других сильных отклонений высшего порядка, почему выполнение названного условия оправдывается только в об'ективах с небольшим полем изображения.

Ясно конечно, что в косых пучках имеются вариации всех аберраций, но до сих пор они не описаны и подробно не изучены.

Из нашего очень сжатого изложения наиболее важных ошибок фотографических об'ективов можно сделать следующие выводы: при расчете хорошего фотографического об'ектива должно быть исправлено много ошибок; при достаточно точной аналитической или при физической поверке системы обнаруживается целый ряд остатков аберраций всех видов. Если после проделанного испытания хотят судить о фактических достоинствах специального фотографического об'ектива, то необходимо учесть, какие из остатков ошибок при работе об'ектива неустранимы

**3 ГЛАВА**

# ТЕОРИЯ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С. Е. ШЕППАРД

## Подразделение материала последующего изложения

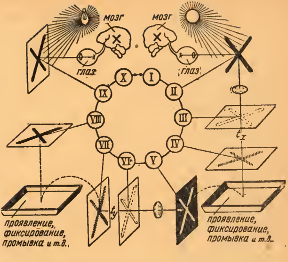
Тремя основными задачами фотографии являются: а) перспективная передача внешнего вида (формы) изображаемого об'екта, б) передача величин яркости, имеющихся в передаваемом об'екте, в) передача цветов об'екта.

(Вероятно можно добавить еще: г) передачу движения об'екта. Следует заметить, что практическое разрешение этой задачи в кинематографии состоит в последовательном воспроизведении отдельных снимков.

В настоящей главе мы ограничимся только изложением теории фотографических процессов и методов, ведущих к получению отдельных снимков.)

Если дан светочувствительный материал, на котором должен быть сделан фотографический снимок, то решение первой задачи (а) определяется в первую очередь законами геометрической и физической оптики. К этому необходимо добавить, что передача тончайших деталей практически зависит от структуры светочувствительного материала. Решение второй задачи (б) зависит от ряда физических и химических процессов, применяющихся при получении фотографического изображения, причем конечный эфект зависит от индивидуальных особенностей нашего зрения. Решение третьей задачи (в), к которому подошли только в последнее время, зависит от возможности разрешения первых двух задач и кроме того от способности глаза визуально отличать разные частоты колебания излучения. На прилагаемой схеме (рис. 31) показана связь между суб'ективным восприятием и фотографическим изоб-

ражением. Для того чтобы правильно разобраться в физических и химических основах фотографии, построим наше изложение нижеследующим образом: 1) светочувствительные материалы, видимое и скрытое изображение; 2) коллоидная химия фотографических материалов; 3) химия процессов для получения негативного изображения и его дальнейшей обработки; 4) химия процессов при получении позитивного изображения; 5) сенситометрия светочувствительного материала, передача величин яркости (тонов); 6) передача минимальных деталей об'екта и структура фотографического изображения; 7) ортохроматическая и цветная фотография.




**31.** Схема получения фотографического изображения (по Джонсу). *I*—суб'ективное представление об'екта в мозгу наблюдателя; *II*—оптическое изображение освещенного об'екта в глазу наблюдателя; *III*—об'ектив отбрасывает изображение об'екта на негативный материал; *IV*—после некоторого определенного времени освещения $t_x$ возникает скрытое изображение; *V*—после проявления получается негатив; *VI*—об'ектив отбрасывает негативное изображение на позитивный материал; *VII*—после некоторого определенного времени освещения $t_y$ возникает скрытое изображение; *VIII*—после проявления получается позитив; *IX*—освещенный лампой накаливания позитив создает оптическое изображение в глазу наблюдателя; *X*—суб'ективное представление позитива в мозгу наблюдателя.

## Светочувствительные материалы. Видимое и скрытое фотографическое изображение

Фотография развилась из фотохимии. Предметом изучения последней являются химические процессы, возникающие под действием света, и обратно — возникновение света в результате химических изменений. Этой стороны фотохимии мы будем касаться только в некоторых случаях, так как под «фотохимическими изменениями» обычно понимаются возбуждение и изменение химических процессов путем светового воздействия.

Слово «свет» может быть применено для обозначения либо визуально воспринимаемой лучистой энергии, либо в более широком смысле обозначает всю лучистую энергию. Обычная фотография занимается главным образом в и д и м о й лучистой энергией, хотя в последнее время фотография при помощи Х-лучей, ультрафиолетовых и инфракрасных лучей приобретает все возрастающее научное значение. Ниже мы помещаем таблицу (см. на стр. 70), в которой сопоставлены различные электромагнитные колебания или изучения с принадлежащими им областями длин волн.

| Область излучеиия | Длииа волны | Частота колебания (число ко)лебаний в секуиду |
|---|---|---|
| $X$-лучи[1] | 0,01 $м\mu$ — 0,1 $м\mu$ | $3 \cdot 10^{19}$ — $3 \cdot 10^{18}$ |
| | 0,1 $м\mu$ — 1 $м\mu$ | $3 \cdot 10^{18}$ — $3 \cdot 10^{17}$ |
| Коротковолнов. ультрафиол. | 10 $м\mu$ - 200 $м\mu$ | $3 \cdot 10^{16}$ — $1,5 \cdot 10^{15}$ |
| Ультрафиолетов. | 200 $м\mu$—400 $м\mu$ | $1,5 \cdot 10^{15}$ — $7,5 \cdot 10^{14}$ |
| Видимая область излучения | 400 $м\mu$—800 $м\mu$ | $7,5 \cdot 10^{14}$ — $3,75 \cdot 10^{14}$ |
| Иифракрасиая[1] область излучеиия (коротковоли.) | 800 $м\mu$—1 $\mu$ | $3,75 \cdot 10^{14}$—$3 \cdot 10^{14}$ |
| Иифракрасиая область излучения (длиниволи.) | 1 $\mu$ —100 $\mu$ | $3 \cdot 10^{14}$ — $3 \cdot 10^{12}$ |
| Электрические волиы | 1 000 $\mu$—1 000 *км* | $3 \cdot 10^{11}$ — $3 \cdot 10^{2}$ |

(Единицы измерения длиииволи. 1 $\mu = 10^{-3}$ *мм*; 1 $м\mu = 10^{-6}$ *мм*; едииица Аигстрема (1 Аигстрем) $\mathring{A} \cdot E = 10^{-7}$ *мм*.)

Почти все известные нам химические реакции можно или возбудить, или катализировать воздействием света, или — пользуясь общим выражением — воздействием лучистой энергии; поэтому фотохимические явления можно наблюдать во всех областях химии. Однако больше всего внимания уделяется химическим изменениям, вызываемым визуальной областью лучистой энергии.

### Природа лучистой энергии

Для об'яснения, или, вернее, описания, явлений лучистой энергии существуют, две противопоставляемые друг другу теории: 1) эмиссионная (или корпускулярная) теория; 2) ундуляционная (или волновая) теория.

*Эмиссионная теория* Ньютона допускает, что светящиеся тела испускают очень маленькие частички, движущиеся по прямым линиям; луч света есть путь одной такой корпускулы. В третьем издании своей оптики Ньютон (это издание приготовлено еще им самим) допускает, что отражение и преломление заключаются в том, что лучам света свойственна периодически меняющаяся склонность либо отражаться, либо преломляться, — он говорит о «приступах» большего отражения или большего преломления. Отношение Ньютона к эфиру не вполне ясно.

*Волновая теория*, выдвинутая в 1678 г. Гюйгенсом, допускает, что свет есть явление колебательного характера, распространяющееся в эфире. Сторонником этой теории сделался Юнг, когда он открыл явление интерференции. В первоначальном изложении этой теории принималось, что колебания света в эфире продольные, подобно колебаниям звука в воздухе; однако таким

[1] Фотографическая активиичиость излучения простирается от $X$-лучей до коротковолновых инфракрасиых лучей. Отиосительио характеристических свойств пластинок, прнмеияемых для этих пограиичных областей, можно заметить следующее:

для $X$-лучей: плотные, очень богатые серебром эмульсии (50% бромистого серебра);

для ультрафиолетовых лучей: эмульсия, почти ие содержащая желатины, экспозиция в вакууме;

для красиых и инфракрасных лучей: эмульсии, сеисибилизированиые красителями.

путем нельзя было удовлетворительно об'яснить, с одной стороны, явления прямолинейного распространения света, а с другой — явление поляризации. Трудности были устранены, когда Френель, развивая мысль Гука (1672 г.), выдвинул теорию, что колебания поперечны и перпендикулярны к направлению их распространения. Это допущение приписывает эфиру свойства эластичного тела с громадной упругостью и ничтожным сопротивлением при прохождении сквозь него тел. Эластическая эфирная теория света в дальнейшем была заменена электромагнитной теорией света Фарадея и Максвелла, согласно которой колебания света являются осциляторными изменениями электрических зарядов и магнитной индукции. При этом принимается, что электрическая сила (или ее вектор) перпендикулярна к магнитной силе (или ее вектору) и обе они перпендикулярны к направлению распространения излучаемой энергии. Эта теория была подтверждена опытами Герца, показавшего, что электрические волны, вызванные осцилляторными разрядами конденсатора, распространяются в пространстве со скоростью света.

За последние два десятилетия представления вновь изменились. Явления электрических разрядов в газах и радиактивность доказывают существование электрически заряженных частиц, движущихся со скоростями преимущественно порядка скорости света. Установление факта, что электрон является изолированным элементом отрицательного электричества, обладающим инерцией отчасти (если не целиком) электромагнитного происхождения и меняющим свою скорость в зависимости от этой инерции, совершенно изменило физические представления о материи и разрушило старое понятие химического атома. М. Планк показал, что в целях определения распределения энергии в спектре «черного тела»[1] полезно допустить, что лучистая энергия испускается прерывисто в виде квантов (атомов энергии).

Один квант (называемый также квантом действия) равен $h\nu$, где $\nu$ означает частоту колебания излучения, а $h$ — универсальную постоянную, равную $6{,}25 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек. Планк рассматривает это представление как стоящее в связи с атомным или вернее субатомным механизмом испускания (первоначально поглощения). При этом допускается, что энергия распространяется в виде непрерывных волн. Возникшее таким путем понятие кванта энергии вошло в теорию фотоэлектрических явлений, внешне выражающихся в виде испускания металлами электронов под действием света. А. Эйнштейн выступил с утверждением, что максимальная энергия излученного электрона не может превысить энергию возбуждающего кванта света; в дальнейшем это удалось подтвердить и экспериментально. Так как энергия излученного электрона находится таким образом в функциональной зависимости от частоты возбуждающего света, то ее величину нельзя выводить из атомной энергии, как при квазирадиактивном процессе. Но так как энергия возбуждающего

[1] Черным телом называется закрытая со всех сторон вычерненная изнутри коробка, имеющая во всех точках одинаковую температуру; излучение из нее выходит только через небольшое отверстие.

излучения распределена по поверхности волны, то не совсем понятно, каким образом вся энергия должна быть концентрирована в излученном электроне. Ввиду местного накопления этой энергии затухание колебательного состояния электромагнитного резонатора невозможно, что допускалось вначале и было бы очень существенно при об'яснении дисперсии и избирательного поглощения.

Трудности, возникающие при об'яснении фотоэлектрического эфекта, исходя из вышеприведенной идеи квантовой теории, были до известной степени ликвидированы допущением Эйнштейна, что энергия не только квантово излучается и поглощается, но и распространяется в пустоте в форме корпускулярных квантов. Полная энергия $h\nu$ такого кванта света не распределяется по поверхности волны, а остается концентрированной (шарообразно). Этим решался вопрос о недостававшей теории излучения Планка концентрации падающей энергии. При этих условиях атомный резонатор может конечно поглотить только или целый квант или не поглотить ничего.

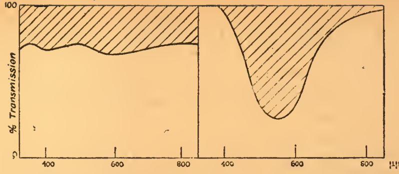
Кванты света Эйнштейна означают таким образом возврат к эмиссионной теории испускания. Они несут не только энергию, но и массу, которая, соответствуя этой энергии, согласно «уравнению относительности» будет равна $m = \frac{h\nu}{c^2}$, где c означает скорость света.

Квантовая теория создала возможность больших успехов в об'яснении фотоэлектрических явлений, а также излучения «черного тела», испускания X-лучей и — благодаря работам Н. Бора и А. Зоммерфельда — в установлении закона испускания прерывистых спектров. Недостаточность квантовой теории, особенно в строго формальном толковании, приданном ей Эйнштейном, состоит в том, что с помощью этой теории нельзя об'яснить диффракцию и интерференцию света — явления, оказавшиеся камнем преткновения и для эмиссионной теории Ньютона.

Следующим недостатком квантовой теории является то, что, исходя из нее, приходится считать, что в свободном пространстве квант может или вернее должен иметь огромные размеры. Г. А. Лоренц установил необходимость допущения, что один квант способен выполнить собой несколько сот квадратных сантиметров поверхности большого об'ектива телескопа, так как интерференционные явления возникают даже при полном отверстии (что можно увидеть, закрыв половину об'ектива); интерференция же возможна только в том случае, когда встречаются излучения с одинаковыми квантами. К этому присоединяется еще и трудность представить себе, как этот квант действует на наш глаз, так как только $^1/_{10000}$ его часть может пройти через зрачок глаза [1].

Для того чтобы об'единить требование концентрированности фотоэлектрической энергии, с одной стороны, с существенными элементами волновой теории — с другой, Дж. Дж. Томсон и Е. Маркс

[1] H. A. Lorenz, Phys. Ztschr., 1910, S. 355.




**32.** Диаграмма, изображающая поглощение: влево — неизбирательное поглощеиие; вправо — избирательное; по оси ордииат отложены проценты пропускаиия

сделали допущение, что энергия распределена хотя и по волновой поверхности, но *неравномерно*, а сконцентрирована преимущественно на некоторых «ярких местах» (bright specks), причем остаточная энергия исчезающе мала. Их представление сводится к тому, что энергия движется этими «яркими местами» по расстилающейся поверхности волны. Кроме того названные авторы привлекли вспомогательную гипотезу о волокнистом строении эфира: согласно этой теории излучаемая энергия, или квант, движется по волокнам эфира подобно силовым линиям, соединяющим максимумы с минимумами.

В настоящее время господствующим воззрением на природу света является так называемая волновая механика, представляющая синтез старых воззрений Ньютона и Гюйгенса в своеобразном видоизменении.

#### Количественные соотношения между энергией падающего и прошедшего света

Если энергию, падающую на единицу поверхности какого-либо тела, обозначить через $E$, то согласно основному принципу сохранения энергии легко получить:

$$E = R + A + T,$$

где $R$ означает отраженную, $A$ — поглощенную и $T$ — пропущенную часть энергии. Следует заметить, что отраженная часть света может отразиться или правильно, как от зеркала, или же неправильно, как от всевозможных небольших поверхностей, образующих друг с другом различные углы; в последнем случае говорят о диффузном (рассеянном) отражении. (Возможны случаи, когда одновременно имеют место оба вида отражения.)

Поглощение (абсорбция) может быть одинаковым для всех длин волн или же избирательным (селективным). При неизбирательной абсорбции поглощенная часть лучистой энергии в различных областях спектра остается неизменной; наоборот, при избирательной абсорбции величина поглощения частей меняется, что вызывает изменение окраски пропущенного света. Упомянутая избирательность может быть выражена очень слабо или, наоборот, сильно, как например у красителей. Если часть света, пропущенную сквозь некоторый слой данного вещества, выразить для видимого

участка спектра в процентах к падающему свету и изобразить в виде диаграммы (рис. 32), то мы получим наглядное представление об избирательной поглотительной способности данного вещества.

Хотя избирательное поглощение должно быть признано важнейшей причиной возникновения цветов в природе, но часто окраска может быть сведена к избирательному отражению, о чем мы будем подробнее говорить ниже.

### Количественные законы поглощения

*Закон отражения Френеля.* Если свет падает нормально на плоскую поверхность, то отраженная часть его составляет $I_r$. Эту величину $I_r$ можно выразить следующим образом:

$$I_r = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} I_0 = RI_0,$$

где $I_0$ означает количество падающего света, а $n$ — показатель преломления среды для света определенной длины волны.

Исходя из этого, количество света, прошедшее через поверхность тела, т. е. проникшее в него, будет:

$$I = I_0 - RI_0 = I_0(1-R).$$

*Закон поглощения Ламберта.* Допустим, что количество света, проникшее в какое-либо тело, равно $I$; если при прохождении тонкого слоя $dx$ поглощающей среды оно уменьшилось на величину $dI = -kIdx$, где $k$ означает константу для данного вещества (коэфициент поглощения), а $dx$ — толщину слоя, то отсюда следует, что

$$dx = -\frac{1}{k} \cdot \frac{dI}{I}.$$

Если затем проинтегрировать от $x = \int$ при котором количество падающего света равно $I$, до $x = l$, при котором количество света равно $I_l$, то получим следующую зависимость:

$$l = \frac{1}{k} \log \text{ nat} \frac{I}{I_l}.$$

Таким образом можно написать закон Ламберта в его общем виде:

$$I_l = I_e^{-\varkappa l},$$

где $I_l$ означает количество выходящего (т. е. непоглощенного) света.

Примененное в этой формуле $k$ обычно меняется с длиной волны света. Приведенный закон устанавливает как условие, что поглощение света молекулярного происхождения, т. е. что каждая молекула поглощает определенную долю того именно света, который проникает сквозь нее. Закон справедлив для стекол (для которых и формулировал его Ламберт) и дает возможность установить аналогичный же закон для растворов.

*Закон Бэра.* В растворах плотность молекул пропорциональна концентрации раствора. Поэтому величина всего поглощения должна зависеть как от концентрации раствора, так и от толщины

проходимого светом слоя. Если через $m$ обозначим концентрацию, то вышеприведенный закон для растворов примет такой вид:

$$I_l = I_l^{-k'ml},$$

где $k'$ означает молекулярный коэфициент поглощения.
Из этой формулы находим $k'$.

$$k' = \frac{\log \text{nat}\, I - \log \text{nat}\, I_l}{m}.$$

При переходе от натуральных логарифмов к десятичным $k'$ называется бунзенским, или десятичным, коэфициентом поглощения, или же показателем поглощения.

### Фотохимический закон поглощения Гроттгуса-Дрэпера

Гроттгус в 1818 г. установил следующий основной принцип: фактическое фотохимическое превращение обусловливается исключительно поглощенными лучами. Этот принцип был забыт, но потом вновь был открыт американским химиком Дрэпером в 1839 г. независимо от его предшественника.

Если толщина слоя поглощающего вещества $d$, то количество света, поглощаемое этим слоем в секунду, будет $I\ (1 - l^{-k'md})$, где $I$ означает количество вошедшего света, $m$ — концентрацию раствора и $k'$ — коэфициент поглощения. (Это относится к монохроматическому излучению.) Принцип Гроттгуса-Дрэпера можно выразить в следующей форме: количество вещества, фотохимически превращающегося в единицу времени, пропорционально поглощенному количеству света; таким образом

$$\frac{dM}{dt} = p \cdot I(1 - e^{-k'md}),$$

где $M$ означает количество превращенного вещества, а $p$ — константу. По Виттверу этот закон можно рассматривать как основной закон скорости фотохимической реакции (то же предложил Вант-Гофф). В действительности происходящих и поддающихся экспериментальной проверке фотохимических реакциях наблюдаются некоторые отклонения от этого закона: фактические скорости реакций иногда больше, иногда меньше, чем можно было бы ожидать по этой формуле, что частично следует отнести за счет взаимодействия смежных молекул и частично за счет роли, которую играют попутно возникающие продукты реакции [1] (вторичные реакции).

### Фотохимическая эквивалентность

Прямым следствием закона Гроттгуса-Дрэпера является то, что между поглощенной лучистой энергией и количеством химически превращенного ею вещества должна существовать количественная эквивалентность (аналогично закону электрохимической эквивалентности Фарадея. А. Эйнштейн установил закон фотохимической эквивалентности, который, количественно осно-

[1] Указанное выше выражение для скорости фотохимической реакции не противоречит закону действия масс; закон о скорости имеет в виду в соответствии с фотохимическим законом поглощения только „активную массу“.

вываясь на законе Гроттгуса, утверждает, что каждая молекула вещества, для того чтобы быть химически превращенной светом (излучением), нуждается в одном кванте $h\nu$. Только в очень немногих случаях экспериментально обнаружилось приближенное численное подтверждение этого положения; обычно число химически превращенных молекул на один квант очень различно; иногда на один квант приходится несколько сот молекул, а иногда несколько квантов соответствуют одной молекуле [1]. Отклонения от теоретического закона пытаются об'яснить утверждением, что закон основан на идеальных допущениях (обратимые, мономолекулярные реакции разреженного идеального газа, обладающего монохроматической полосой поглощения исчезающе малой ширины). Идеальным фотохимическим реакциям, подчиняющимся принципу фотохимической эквивалентности, Ф. Вайгерт противопоставляет фактические фотохимические реакции [2]. Для нашего дальнейшего изложения экспериментальной фотохимии важно установить классификацию фактически происходящих, реальных фотохимических реакций.

### Примеры фотохимических реакций

Фотохимические изменения мы обнаруживаем не только при некоторых типичных реакциях, но также и при простейших квазифизических или «молекулярных» превращениях в очень сложных процессах химического соединения и разложения. В нижеследующей таблице дано несколько примеров.

**Типы фотохимических реакций**

| | |
|---|---|
| Аллотропические видоизмеиеиия (образоваиие различиых кристаллических форм) | Сера<br>Свет<br>*Sромб* $\rightleftarrows$ *S аморфн.*<br>инфракрасиый |
| Интрамолекуляриые превращеиия и изомеризации (превращение цисформы в траисформу) | Фумаровая кислота $\rightleftarrows$ Малеииовая кислота<br>COOH—C—H  H—C—COOH<br>H—C—COOH  H—C—COOH |
| Полимеризация и деполимеризация | Аитрацеи $\rightleftarrows$ Диаитрацеи<br>кислород $3O_2$ $\rightleftarrows$ озои $2O_3$ |
| Гидролиз | $(CH_3)_2 \cdot CO + H_2O = CH_3 \cdot COOH + CH_4$<br>ацетои вода укс. кислота метаи |
| Восстаиовлеиие | $2AgCL = 2Ag + Cl_2$<br>хлористое серебро, серебро, хлор |

[1] Позднейшие исследоваиия Нериста показали, что закои Эйиштейиа довольио хорошо выполияется, когда реагирующая молекула связывается с подходящим акцептором, выражаясь электрохимически—деполяризатором. Затем И. Эггерт и В. Ноддак, а также Ф. Вайгерт (Sitz.-Ber. d. preuss. Akad. d. Wiss., 1921, 38, S. 631, 641) подтверждают, что фотографическая эмульсия следует закоиу эквивалеитиости, а имеиио: одии кваит света длииы волиы $\lambda = 408$ *м.* $\mu$ дает одии атом серебра.

[2] Vgl. F. Weigert, Zeitschr. f. Elektrochemie, 23, 357, 1917.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Окисление | $PbS$ сернист. цинк | + | $2O_2$ кислород | = | $PbSO_4$ сернокислый цинк |
| Разложение | $2HJ$ иодистый водород | = | $H_2$ водород | + | $J_2$ иод |
| Синтез | $CO$ окись углерода | + | $Cl_2$ хлор | = | $COCl$ фосген |

**Классификация фотохимических реакций**

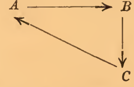
По причине разнообразия фотохимических реакций чисто химическая классификация их невозможна. Гораздо лучше установить иного рода классификацию, для чего рассмотреть:
*1) энергетику* фотохимических процессов, т. е. условия химического равновесия и обмена энергии, и
*2) кинетику* реакций, т. е. химические скорости или ускорения.
Первая классификация принципиально важнее.
В энергетическом отношении фотохимические реакции делятся на
) реакции, накопляющие работу, как например синтез растительного крахмала из углекислоты и воды;
б) реакции, совершающие работу, как например:

$$\underset{\text{бензохинон}}{C_6H_4O_2} + \underset{\text{этиловый алкоголь}}{C_2H_5OH} = \underset{\text{гидрохинон}}{C_6H_6O_2} + \underset{\text{ацетальдегид}}{CH_3 \cdot CHO}$$

Подразделение можно сделать также, исходя из несколько иной точки зрения:
) Простые, обратимые фотохимические реакции, в которых путем идущего в темноте обратного процесса воспроизводится исходное вещество, что можно изобразить следующей схемой

$$A \underset{\text{темнота}}{\overset{\text{свет}}{\rightleftarrows}} B$$

β) Сложные, псевдообратимые реакции, которые происходят в результате одной или нескольких, следующих одна за другой, световых или темновых реакций. Исходное вещество образуется из конечного продукта иным путем. Схема, изображающая такую реакцию, выглядит следующим образом:




γ) Необратимые и каталитические реакции. Первичная химическая световая реакция образует некоторое вещество, служащее катализатором для обыкновенной (темновой) реакции.

Хотя обратимость фотохимических процессов имеет очень мало значения для практической фотографии, но приведенное разделение все же может оказаться полезным. (Простая химическая световая реакция, конечный продукт которой восстанавливается обратно в темноте, была бы конечно практически бесполезной, исключая случаи, когда особо принимаются меры, препятствующие обратному ходу процесса. Кроме того сопряжение различных реакций позволяет получить одновременно и химическую и оптическую сенсибилизацию к чему мы еще вернемся.)

С точки зрения химической кинематики (б), химические световые реакции проще всего разделить на прямые и непрямые реакции. Прямыми называются реакции, которые вызываются воздействием света и могут быть получены непосредственно. Непрямыми называются реакции, получающиеся путем сопряжения с прямой реакцией. Ускорению непрямой реакции содействует образование положительного фотокатализатора или разрушение отрицательного. Примером этого может служить соединение под действием света водорода и хлора с образованием хлористого водорода.

### Видимое и скрытое (латентное) изображение

Так как результата действия света на фотографическую пластинку непосредственно нельзя увидеть, то полученное вначале изображение называется скрытым. Способность скрытого изображения проявляться основана на том, что оно каталитически влияет на другую реакцию. Например раствор красной кровяной соли, выставленный на свет, ускоряет разложение в темноте перекиси водорода; затем хлор, побывавший на свету, разлагает озон, однако не в темноте. На веществах, находящихся в жидком или газообразном состоянии, не может получиться запечатлевающихся фотографических изображений, так как продукты реакции, едва лишь образовавшись, сейчас же стремятся, по закону диффузии Фикка, распространиться от областей с высшей концентрацией в области низших концентраций. Ясно, что образовавшийся под действием света продукт будет стремиться распространиться из областей высшей световой интенсивности в области низшей световой интенсивности; в результате должно происходить выравнивание, препятствующее образованию остающегося оптического изображения. Поэтому материалы, применяемые в практической фотографии, должны иметь твердую или почти твердую консистенцию. Тем не менее тенденция фотохимических продуктов реакции к диффундированию играет важную роль в фотографических процессах.

Возможно, что первичное изменение под действием света в зерне галоидного серебра просто состоит в перегруппировке электронов, которые освобождаются вначале с поглощающих свет ионов брома и соединяются затем с ионами серебра, находящимися на поверхности. Второе изменение заключается в диффузии брома из глубины зерна и его поверхности.

### Природа видимого и скрытого (латентного) изображения в галоидосеребряных эмульсиях

Хотя в фотографии очень важную роль играют многие реакции (некоторые из них мы детально опишем), все же самое большое значение принадлежит реакциям действия света на галоидные соединения серебра. Поэтому содержанием ближайшего отдела будет точное описание именно этих реакций.

Сначала опишем природу действия света на галоидное серебро и получающиеся при этом продукты. Все три галоидных соединения серебра: AgCl — хлористое серебро, AgBr — бромистое се-

ребро и AgJ — иодистое серебро, разлагаются светом. Степень почернения приблизительно соответствует последовательности этих соединений в приведенном ряду (светочувствительность препаратов в сильной степени зависит от способа обработки). Уже Шееле (в 1777 г.) показал, что почернение хлористого серебра сопровождается уменьшением количества хлора. Можно совершенно определенно утверждать, что при образовании видимого изображения у всех галоидных солей серебра галоид отщепляется. Этот факт косвенно доказывается тем, что реакционная способность их повышается (сенсибилизируется) при применении веществ, поглощающих галоид. В нормальных дневных бумагах (о них см. ниже) с этой целью применяется азотнокислое серебро или серебряная соль органической кислоты, например лимоннокислое серебро. В бромосеребряных бумагах, применяемых например в актинометрах (для определения продолжительности экспозиции), с этой целью обычно пользуются азотистокислым натрием; во всяком случае требуется какое-нибудь поглощающее галоид вещество, так как почернение совершенно сухой галоидной соли серебра в вакууме оказывается очень незначительным и неустойчивым.

Природа почерненного продукта долгое время служила предметом противоречивых суждений. Утверждение, что в результате реакции образуется металлическое серебро, встречало различные возражения; самое важное из них то, что изображение противостоит действию веществ, растворяющих серебро, например концентрированной азотной кислоты.

Предполагали, что образуется с у б г а л о и д серебра согласно нижеследующему уравнению:

$$4Ag\left\{\begin{matrix}Cl\\Br\\J\end{matrix}\right. \underset{\text{свет}}{=} 2Ag_2\left\{\begin{matrix}Cl\\Br\\J\end{matrix}\right. + \left\{\begin{matrix}Cl_2\\Br_2\\J_2\end{matrix}\right.$$

Однако было совершенно невозможно ни безукоризненно изолировать это соединение, ни получить соответствующий ему окисел $Ag_4O$. В то время как Гунтцу удалось изолировать в совершенно ясном, химически различимом виде субфтористое серебро $Ag_2F$ (причем наблюдения Гунтца были подтверждены Л. Велером), допущение существования остальных субгалоидов можно было отстаивать только по аналогии. В то же время американский химик Кэри Ли, опубликовавший много фундаментальных работ по фотохимии, различными методами комбинированных реакций и путем действия галоидов на серебро синтетически получил продукты, очень похожие на фотогалоиды, получающиеся при действии света. Этим продуктам были свойственны такой же неопределенный состав в смысле соотношения серебра и галоида, та же расцветка и одинаковая сопротивляемость кислотам и окисляющим растворам. Кэри Ли заключил, что фотогалоиды должны быть особыми соединениями субгалоида серебра $Ag_2Hal$ с нормальной галоидной солью AgHal, причем соотношение обеих составных частей зависит от способа получения.

Одновременно названный ученый описал методы приготовления различных аллотропических растворимых форм серебра, имевших различную окраску; он допускал, что в фотогалоидах содержится именно аллотропическое серебро. Позднейшие исследования принесли мало нового для решения загадки природы фотогалоидов, но удалось доказать, что аллотропические формы серебра состоят из коллоидного серебра и что фотогалоиды являются продуктами присоединения коллоидного серебра к какой-нибудь из галоидных солей серебра. Таким образом состав фотогалоидов и видимое фотографическое изображение, образованное серебряными соединениями, являются проблемой коллоидной химии, которую мы рассмотрим в ближайшем отделе этой главы. Мы увидим, что Ли не только предугадал природу соединения, но даже уловил родство своих коллоидных серебряных препаратов с фотогалоидами.

Различие во взгляде на природу видимого фотографического изображения на галоидных соединениях серебра, как мы уже сказали, велико; относительно природы скрытого изображения взгляды еще больше разнятся. Грубо говоря, имеется два существенно различных представления о скрытом изображении: первое допускает, что скрытое изображение заключается в химическом изменении (принципиально аналогичном имеющемуся в видимом изображении и разнящемуся только количественно), второе утверждает, что изменение — не химической, а физической природы, т. е. что свет вызывает физическое изменение галоидных солей серебра.

Различные гипотезы можно сгруппировать следующим образом:

*Физические теории:* а) теория распыления, б) теория деполимеризации, в) теория молекулярного напряжения и г) фотоэлектрическая теория.

*Химические теории:* а) теория зародышевого серебра, б) субгалоидная теория и в) теория коллоидного серебра.

*Теория распыления*. По этой теории свет оказывает механическое распыляющее действие на галоидное серебро; частицы последнего превращаются в более мелкие, вследствие чего быстрее реагируют с восстанавливающим раствором, примененным в качестве проявителя. Эта теория не согласуется с тем фактом, что скрытое изображение может быть разрушено окисляющими веществами. Единственным доказательством в пользу теории распыления является наблюдение, приведенное Люппо-Крамером. Если достаточно хорошо осветить пластинку и затем обработать ее в концентрированном водном растворе аммиака или, еще лучше, подвергнуть действию паров аммиака, то изображение проявляется. Это явление можно об'яснить тем, что в местах, измененных светом, идет ускоренная перекристаллизация галоидного серебра с превращением его в аммиачное галоидосеребряное соединение. Люппо-Крамер считает, что это следует приписать повышенной растворимости распыленных составных частей галоидного серебра.

Однако автор и А. Тривелли показали, что в данном случае дело сводится фактически к начальной стадии образования видимого изображения и что фотохимические продукты разложения образуют центры рекристаллизации.

*Теория деполимеризации* предложена Хертером и Дриффильдом. Согласно этой теории свет разлагает бо́льшие агрегаты молекул на меньшие по следующей схеме:

$$(\mathrm{Ag\,Br})_m \xrightarrow[\text{Свет}]{} m\,\mathrm{Ag\,Br}$$

Эту теорию можно до известной степени рассматривать как химическую; ей, с одной стороны, нехватает прямых доказательств, а с другой — современная теория строения материи, выведенная на основании анализа кристаллов с помощью рентгеновских лучей, показывает, что химическая молекула в смысле специально связанной атомной пары AgBr в твердом состоянии вовсе не существует; на самом деле имеется пространственная решетка ионов серебра и брома, взаимно связанных электростатическими силами притяжения противоположно заряженных ионов; строение этой пространственной решетки таково, что каждый ион серебра окружен шестью ионами брома, расставленными в вершинах куба; аналогично — каждый ион брома окружен шестью ионами серебра.

В соответствии с этим основание теорий, допускающих изменение в расположении молокул, очень непрочное. Поэтому т е о р и я м о л е к у л я р н о г о н а п р я ж е н и я, выдвинутая И. Бозе, тоже не имеет прочной базы. Бозе предполагал, что молекулы подвергаются некоторому напряжению, в результате чего скорее возможно их разложение.

*Фотоэлектрическая или электронная* теория скрытого изображения основана на известной способности света вызывать испускание электронов различными веществами, в особенности металлами, красками, сульфидами и галоидным серебром. Эта теория в ее современном состоянии страдает основным недостатком, а именно тем, что она не дает удовлетворительного об'яснения изменению скрытого изображения под действием химического окисления и различных восстанавливающих веществ. Она в достаточной степени не раз'ясняет ни того, почему скрытое изображение разрушается путем окисления, ни того, почему восстанавливающие вещества предпочтительно восстанавливают ту часть галоидного серебра, которая была изменена светом.

*Теория зародышевого серебра* выдвинута в 1850 Гутри. Он считал, что под действием света возникает маленькое зерно (зародыш) металлического серебра, которое притягивает из «мокрой пластинки» или из физического проявителя серебро. Относительно бо́льшую стойкость скрытого изображения к воздействию азотной кислоты Гутри об'яснял до известной степени «пассивным» состоянием серебра. Теория Гутри в наше время нашла себе сторонника в лице Р. Абегга и была им не столько повторена, сколько переработана в теорию коллоидного серебра.

*Субгалоидная теория* скрытого изображения является видоизменением субгалоидной теории видимого изображения. Доводы за и против этой теории для скрытого изображения те же, что и для видимого.

Теорией, давшей больше всего пользы, является до настоящего времени теория коллоидного серебра, согласно которой скрытое изображение есть просто первая стадия в ряду фотогалоидов, причем фотогалоид состоит из коллоидного серебра, адсорбированного обыкновенной галоидной солью. Основы этой теории будут подробно рассмотрены в ближайшем отделе. Существенное возражение против химических теорий скрытого изображения заключается в том, что падающая энергия, обусловливающая способность пластинки к проявлению, слишком мала для того, чтобы вызвать химическое изменение.

Новейшие исследования дали повод сомневаться в основательности этого возражения. Было доказано, что так называемая чувствительность эмульсии по своей природе близка к „скрытому изображению", так как ее можно разрушить окисляющими веществами и возвратить восстанавливающими средствами. Поэтому вполне вероятно, что „чувствительность" можно свести к наличию коллоидного серебра. Имеются две гипотезы для об'яснения, каким образом коллоидное серебро может влиять очувствляюще,

а) Ф. Ф. Ренвик об'ясняет действие света тем, что под его влиянием происходит коагуляция амикронов коллоидного серебра в большие частицы, способные играть роль центров проявления. б) Вторая гипотеза утверждает, что под действием света происходит внутренняя перегруппировка электронов аналогично молекулярной перегруппировке, при которой электроны, освобождаемые коллоидным серебром, воспринимаются серебряными ионами кристалла галоидного серебра и восстанавливаются до металлического серебра. Если эти ионы серебра — акцепторы—подходящим образом сгруппированы на поверхности, то при проявлении они могут играть роль зародышей. Ясно, что светочувствительное зерно фотогалоида будет различно в широких пределах как в отношении содержания металлического серебра, так и в отношении его распределения. В такой форме теорию коллоидного серебра можно согласовать с фотоэлектрической теорией.

Раньше мы утверждали, что металлическое серебро, образовавшееся под действием света, не сравнимо со свободным металлическим серебром, так как оно адсорбировано остающимся галоидным серебром и «защищено», а также и потому, что оно образует фотогалоид с очень малым содержанием серебра. Распределения серебра в зерне галоидного серебра мы коснемся ниже.

Здесь следует отметить, что в этом отношении за последнее время пришли к заслуживающим внимания результатам и нашли аргументы в пользу допущения, что в большинстве случаев в результате поверхностной адсорбции происходит настоящее химическое соединение, причем адсорбирующий слой не толще одного атома. Поэтому можно допустить существование соединений, находящихся в твердом состоянии и не имеющих определенного состава, так как он зависит от отношения поверхности твердых частиц к их об'ему; состава этих соединений не согласуется с нормальными принципами валентности. Ясно, что таким путем может быть создана видоизмененная субгалоидная теория, не настаивающая однако на существовании определенного вида $Ag_2Hal$.

### Спектральная чувствительность и оптическая сенсибилизация

Для идеальных фотохимических реакций, т. е. для реакций, подчиняющихся закону эквивалентности Эйнштейна, квант энергии, превращающий одну молекулу, равен $h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, где $c$ означает скорость света, а $\lambda$ — длину волны. Следовательно с возраста-

нием длины волны света для фотохимического превращения необходимо меньшее количество энергии и наоборот; или, другими словами: если длина волны возрастает, то определенным количеством энергии можно превратить большее число молекул. Однако экспериментальным путем было найдено обратное: чувствительность возрастает при освещении меньшими длинами волн, т. е. при движении по спектру от инфракрасного к ультрафиолетовому. По закону Гроттуса — Дрэпера спектральная чувствительность данной реакции определяется спектром поглощения; однако редко наблюдается, чтобы изменение скорости реакции с длиной волны вполне соответствовало спектру поглощения. Вероятно это можно свести к тому, что в действительности при реакциях возникают некоторые усложнения под влиянием других молекул и атомов, непосредственно не принадлежащих первичному светочувствительному веществу (продукты реакции сами тоже оказывают влияние). Лучшим примером зависимости между спектром поглощения и фотохимической скоростью реакции является выцветание на свету красок, изученное Лазаревым.

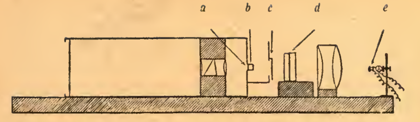


**33.** Схема спектра поглощения. По оси абсцисс отложены длины волн, а по оси ординат—поглощение

Спектр поглощения исследуемого вещества количественно изображается таким образом: рассмотренные нами выше величины поглощения наносятся по оси ординат, а длины волн — по оси абсцисс. Измерения производятся спектрофотометром. Этот прибор представляет собой комбинацию спектрометра, определенным образом разлагающего свет, и фотометра, служащего для определения интенсивности по спектру; при этом верхняя половина спектра ослабляется поглощающей средой, а нижняя половина ослабляется различными средствами; для этой цели применяются вращающиеся секторы, нейтральные оптические клинья или поляризационные призмы.

Для фотографических целей обычно молекулярные коэфициенты поглощения не определяются. Для растворов красок или окрашенных солей определяют бунзенское, или десятичное, поглощение при 1 *см* толщины слоя (измерение производится при определенной концентрации). Для окрашенных стекол и пленок, применяемых в качестве светофильтров, дается показатель поглощения без особого указания на толщину слоя. На рис. 33 дан пример такого изображения спектра поглощения.

Спектрофотометрическое исследование по описанному методу связано с длинным рядом измерений для каждой отдельной дли-




**34.** Прибор для определения спектра поглощения по К. Мизу: *a* — щель, *b* — клинья, *c* — затвор, *d* — компенсационный фильтр, *e* — штифт Нериста

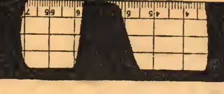


**35.** Кривые чувствительности различных сортов пластинок: *1* — обыкновенная фотографическая пластинка, *2* — ортохроматическая пластинка, *3* — панхроматическая пластинка

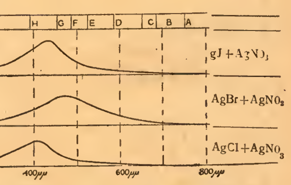
ны волны по всему спектру. Этот метод работы занимает много времени и утомителен, поэтому для технических целей придуманы различные методы, позволяющие сразу получить весь спектр поглощения в один прием. Наиболее простой из этих методов состоит в применении клиновидной ячейки, содержащей поглощающий раствор и установленной перед щелью спектроскопа таким образом, что направление клина параллельно щели. К. Миз применял две клиновидные прямоугольные ячейки, которые, будучи составлены вместе, образовали призму. Длина призмы внутри составляла 1 *см*, а ширина — 5 *мм* (указаны размеры внутри). Полученная таким путем призма была разделена по диагонали. Одна из клиновидных ячеек наполнялась исследуемым раствором, а другая просто растворителем (обычно водой) (рис. 34).

Поглощение раствора изменяется с толщиной слоя от одного конца клина (и тем самым и щели) до другого, именно от толщины, почти равной нулю, до толщины в 5 *мм*. Фактическое отношение между толщиной на обоих концах составляет 1 : 15. При условии, что взятая фотографическая пластинка одинаково чувствительна ко всему спектру примененного света, полученные при помощи клина фотографии будут передавать изменение поглощения с увеличением толщины слоя. Поскольку справедлив закон Бэра, поглощение будет увеличиваться с возрастающей концентрацией раствора. Для того чтобы пластинка обладала равномерной

светочувствительностью по всей исследуемой спектральной области, она прежде всего должна быть чувствительна ко всем могущим встретиться здесь длинам волн. Так как равномерной чувствительности пластинки трудно добиться, имеющиеся отклонения компенсируются специальными поглотительными фильтрами (экранами). Миз в большинстве своих работ пользовался панхроматической пластинкой, обладающей спектральной чувствительностью, изображенной на рисунке 35, *3* (применительно к свету лампы Нернста, особо удобной для подобных исследований, так как испускаемый свет дает сплошной сектр). Необходимая компенсация достигается специальным фильтром и двумя кюветами с растворами мандариноранжа или *p*-нитрозодиметиланилина. Таким путем получился очень равномерный спектр от 7 200 Å до 3 900 Å с убывающей интенсивностью — справа до 7 500 Å и слева до 3 500 Å. Убывание зависит от самого источника света. На рис. 36 показан спектр поглощения раствора ксиленрота (полученный с помощью клиновидной ячейки).



**36.** Спектр поглощения раствора ксиленрота (полученный с помощью клиновидной ячейки)

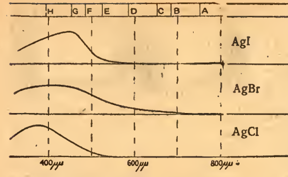



**37.** Кривые спектральной чувствительности эмульсий для дневной печати

Совершенно аналогичным путем определяется спектральная чувствительность фотографической эмульсии. Щель спектрографа освещается лампой Нернста, перед щелью помещается нейтрально серый клин, т. е. клин, наполненный жидкостью, не обладающей избирательным поглощением. Таким образом щель спектрографа освещается рядом последовательно убывающих интенсивностей, соответствующим градации клина. После проявления фотографии клинового спектра получается кривая спектральной чувствительности данной пластинки (рис. 35).

На рис. 37 даны кривые спектральной чувствительности галоидного серебра в эмульсиях для дневной печати, а на рис. 38 — в эмульсиях с проявлением.

Кривые на рис. 37 и 38 не представляют собой величин постоянных во всех случаях, так как спектральная чувствительность эмульсии, содержащей те же самые галоиды, в каждом случае зависит от различных обстоятельств (способ приготовления, про-



38. Кривые спектральной чувствительности эмульсий с проявлением



39. Кривые спектральной чувствительности бромосеребряной эмульсии: *1* —несенсибилизированная, *2* — сенсибилизированная эритрозином, *3* — сенсибилизированная пинацианолом

должительность проявления и т. д.). В общем можно сказать, что чувствительность от максимума в фиолетовом сильно падает в направлении как красного, так и ультрафиолетового. Ультрафиолетовая область имеет большое значение для научных целей, но гораздо важнее визуально воспринимаемая область спектра. Поэтому открытие Фогеля, что путем обработки эмульсии различными красителями можно сделать ее чувствительной к желтым и зеленым лучам, означало громадный шаг вперед и повело к возникновению так называемой ортохроматической фотографии с правильной передачей относительных яркостей различных цветов. На рис. 39 показано влияние различных сенсибилизаторов на спектральную чувствительность эмульсии.

Пока еще остается вопросом, как именно действуют эти сенсибилизаторы. Получающаяся после сенсибилизации спектральная чувствительность галоидного серебра почти совпадает со спектрами поглощения примененных красителей, только максимум немного сдвинут в сторону более длинных волн.

Это смещение зависит повидимому от того, что краска на поверхности галоидного серебра находится в твердом состоянии; это твердое состояние обусловливает модификацию спектра поглощения по сравнению со спектром раствора (измененная оптическая плотность среды). Большинство очувствляющих красителей само по себе светочувствительно (к этому надо заметить, что не все красители годятся в качестве сенсибилизаторов).

Имеются следующие три приемлемые допущения для об'яснения очувствления:

1. Фотохимический продукт реакции красителя вносит нечто свое, в результате чего галоидное серебро разлагается непосредственно или при проявлении.

Краситель обладает фотоэлектрическими свойствами; в результате поглощения света при экспозиции он испускает электроны, действующие на галоидное серебро и дающие на нем скрытое изображение.

2. Краситель имеет в фиолетовом или в ультрафиолетовом свете полосу флуоресценции, которая путем поглощения в видимой спектральной области в той или иной мере возбуждается, в результате чего галоидное серебро приобретает способность проявляться.

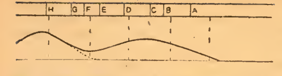
Последнее допущение как-будто противоречит закону Стокса о флуоресценции, гласящему, что возбужденное излучение имеет более длинные волны, чем возбуждающее. Однако было доказано, что этот закон, вообще говоря, правильный, неабсолютно справедлив в отношении максимумов возбуждающего и возбужденного спектров.

Оптическая сенсибилизация с помощью красителей, о которой идет речь, открыта Фогелем в 1872 г. Правда, действие красителей наблюдал еще в 1840 г. Е. Беккерель в одном из своих опытов, когда он, действуя солнечным спектром, на дагерротипную пластинку, заметил, что скрытое изображение, вызываемое синими лучами, могло быть выявлено последующим освещением желтыми и красными лучами. Кроме того он наблюдал, что дополнительное освещение желтыми и зелеными лучами пластинки, предварительно освещенной синим светом, вызывает скрытое изображение от желтых и зеленых лучей, которое могло быть нормально проявлено парами ртути. Беккерель предположил, что это явление следует отнести за счет различия лучей, обладающих разными свойствами, при чем более короткие (синие) лучи — „в о з б у ж д а ю щ и е  л у ч и", а более длинноволновые — „п р о д о л ж а ю щ и е  л у ч и" (rayons excitateurs и rayons continuateurs). Фогель и Ценкер более правильно приписали это явление увеличенному поглощению более длинных волн. Точнее об'яснение наблюденного Беккерелем факта было дано значительно позже Люппо-Крамером, который нашел, что фотохлорид, синтетически приготовленный путем одновременной коагуляции коллоидного серебра и коллоидного хлористого серебра, панхроматичен, т. е. чувствителен по всему видимому спектру, как это явствует из приведенной И. М. Эдером кривой чувствительности хлоросеребряного слоя (рис. 40).

О п т и ч е с к а я сенсибилизация достигается п р и б а в л е н и е м веществ; сенсибилизация к более коротким длинам волн достигается о т н я т и е м веществ, поглощающих эти лучи прежде, чем они достигнут соли серебра. Чувствительность обыкновенных пластинок к ультрафиолетовому (при пользовании оптическими системами из кварца) очень быстро падает для лучей с длиной волны, меньшей 2 200 Å.

В. Шуманн показал, что последнее об'ясняется не отсутствием чувствительности бромистого серебра к этим коротким длинам волн, а в гораздо большей степени п о г л о щ е н и е м коротких волн ж е л а т и н о й. Он приготовлял галоидосеребряные слои без желатины и экспонировал их в вакууме; таким путем ему удалось распространить фотографическую спектроскопию далеко в ультрафиолетовую область.

В специальных эмульсиях для рентгеновских лучей желательна как можно большая концентрация бромистого серебра, при этом толщина слоя не должна вредно отражаться на способности пластинки к проявлению. Делались попытки, хотя и без большого успеха, сделать эти эмульсии более чувствительными путем прибавления инертных металлических солей. Этим думали вы-




**40**. Кривая спектральной чувствительности хлористого серебра, содержащего коллоидное серебро

звать вторичное (рассеянное) излучение. Важнейшим вспомогательным средством для сокращения времени экспозиции служат «усилительные экраны» — это картонные или целлюлоидные поверхности, гладко и равномерно покрытые тонко измельченным вольфраматом кальция. Обработанные таким образом поверхности производятся в соприкосновение с эмульсией. Рентгеновское излучение возбуждет флуоресценцию в вольфрамовом слое. Возникающий свет имеет синевато-голубую окраску и потому дает изображение.

С помощью таких экранов время экспозиции может быть довольно сильно сокращено (почти до ¼ или ⅙).

Применение цветочувствительных пластинок, в особенности же панхроматических, привело к тому, что приходится уделять много внимания освещению темной комнаты (как в отношении количества, так и качества света). При работе с ортохроматическими пластинками большей частью достаточно позаботиться о том, чтобы освещение было рассеянным и не очень сильным. При проявлении же панхроматических пластинок пользуются специальным зеленым освещением темной комнаты, которое должно быть очень слабым.

Совсем недавно Люппо-Крамер открыл десенсибилизирующее действие некоторых красителей, взятых в очень слабых концентрациях (в особенности феносафранина), при пользовании которыми проявление панхроматических пластинок можно вести при усиленном освещении темной комнаты. Если к проявителю прибавить самое незначительное количество феносафранина, то можно проявлять даже при желтом свете после того, как пластинка была в темноте погружена в проявитель. Как действуют эти десенсибилизаторы, не оказывающие никакого влияния на скрытое изображение, пока неизвестно, но этот метод проявления очень многообещающий, в особенности при фотографировании рентгеновскими лучами.

### Литература

J. M. Eder, Ausführliches Handbuch der Photographie, Bd. 1, 2. Teil, Photochemie (die chemischen Wirkungen des Lichtes), 3 Aufl., Halle a. S., W. Knapp, 1906
J. Plotnikow, Lehrbuch der allgemeinen Photochemie, Berlin und Leipzig Walter de Gruyter & C., 1920.

J. Plotnikow, Grundri der Photochemie, Berlin und Leipzig, Walter de Gruyter & C., 1923.

F. Weigert, Die chemischen Wirkungen des Lichts, Sammlung chemischer und chemischtechnischer Vorträge, Bd. 17, Heft 6 - 8. Stuttgart, Ferdinand Enke, 1911.
S. E. Sheppard, Lehrbuch der Photochemie, deutsch von Max Iklé, Leipzig, Joh. Amb. Barth., 1916.

A. Benrath, Physikalische Chemie. II Teil (Thermische und photochemische Gleichgewichts und Geschwindigkeitslehre), Sammlung Wissenschaftliche Forschungsberichte, Bd. 14, Dresden und Leipzig, Theod. Steinkopff, 1925.

Ergebnisse der exakten Saturwissenschaften, Bd. 1, Artikel von Max Bodenstein, Photochemie, Berlin, J. Sprinder, 1922.
G. Krüss und H. Krüss, Kolorimetrie und quantitative Spektralanalyse in ihrer Anwendung in der Chemie, Hamburg und Leipzig, Leopold Vo B, 1909.
W. Smekal, Allgemeine Grundlangen der Quantentheorie und Quantenstatistik, Enzyklopädie der math, Wiss, Bd. V, Leipzig und Berlin. B. G. Teubner, 1925.
Lüppo-Cramer, Die Grundlagen der photographischen Negativverfahren (Auf Handb. d. Phot, herausgegeben von I. M. Eder, Bd. II, I Teil), Halle a S. W Khapp, 1927.
Handbuch der Phusik, herausgegeben von H. Geiger und Karl Scheel, Bd. 23, Quahten (Kapitel: Photochemie von W. Noddack und Kapitel: Quantentheorie von W. Pauli), Berlin, I. Sprinder, 1926.
J. Eggert, Lehrbuch der physikalischen Chemie in elementarer Darstellung, Leipzig, S. Hirzel, 1926.

## Коллоидная химия фотографических материалов и процессов

### Общие сведения

Вероятно ни один отдел химии не находит себе такого широкого применения в фотографии, как коллоидная химия. Глазговский химик Т. Грэм, занимаясь исследованиями по теории растворов, открыл, что некоторые растворенные вещества проходят через животные перепонки (например бычий пузырь), что не свойственно другим веществам. Типичными растворимыми веществами, не проходящими через органические перепонки, будут клей, белок, кремнекислота и т. д., в то время как другие вещества, как например поваренная соль, легко проходят через такие перепонки. В соответствии с этим Грэм разделил все вещества на две группы:

*Коллоидные вещества* (коллоиды[1]), которые не проходят через органические перепонки;

*Кристаллоидные вещества* (кристаллоиды[2]), у которых имеет место обратное явление.

Коллоидные растворы отличаются от истинных, или кристаллоидных, растворов тем, что в первых с помощью соответствующего микроскопа или ультрамикроскопа можно различить отдельные частицы «растворенного вещества» (дисперсной фазы), а у вторых — этого различить нельзя.

Из сказанного с полным правом можно заключить, что в коллоидных растворах вещество растворено не молекулярно, как в кристаллоидных; другими словами, в коллоидных растворах то, что растворено, находится в форме больших агрегатов молекул (мицелл).

Коллоидное состояние не есть специфическое свойство дающих клей веществ; путем соответствующей обработки любое вещество может быть приведено в коллоидное состояние.

[1] κόλλα — клей.

[2] Это обозначение не больше чем технический термин и не имеет ничего общего с понятием о кристалле.

Допустим, что масса $m$ какого-либо вещества с удельным весом $\rho$ состоит из $n$ зернышек. Такое измельченное вещество называется дисперсной системой, а состояние измельчения — дисперсией.

Если допустить, что мы имеем дело с маленькими шариками (с радиусом $= r$), то

$$n \cdot \frac{4r^3\pi \cdot \rho}{3} = m; \qquad 1$$

$$n \cdot 4\pi r^2 = S, \qquad 2$$

где $S$ означает общую поверхность всех шариков.

Отношение поверхности дисперсной системы к занимаемому ею об'ему называется дисперсностью ($d$). Поэтому можно написать:

$$d = \frac{S}{V} = \frac{S\rho}{m}. \qquad 3$$

Если дисперсность очень велика, то перед нами молекулярно дисперсная система, или кристаллоид; если она сравнительно мала, то говорят о грубодисперсных системах. Коллоидные вещества — это дисперсные системы средней степени дисперсности.

**Дисперсные системы**

| Грубодисперсные системы | Коллоиды | Молекулярно-дисперсные системы |
|---|---|---|
| Диаметр частиц больше 0,1$\mu$ через фильтровальную бумагу не проходят. Частицы могут быть „разрешены“ микроскопом при 2 000—3000-кратном увеличении (видно изображение самих частиц) | Диаметр частиц от 0,1 $\mu$ до 1 $m\mu$. Сквозь фильтровальную бумагу проходят. Микроскопом частицы не могут быть „разрешены“ (изображение самих частиц увидеть нельзя). Растворы не диффундируют. | Диаметр частиц меньше 1$m\mu$. Сквозь фильтровальную бумагу проходят. Растворы диффундируют и способны к диализу. |
| Суспензии Эмульсии | Суспензоиды Эмульсоиды | Истинные растворы |

Коллоидные вещества можно рассматривать и с иной точки зрения. Применяя закон термодинамического равновесия, можно предсказать наперед поведение некоторых веществ в растворе, зная их химический состав и физическое состояние в данный момент. У других растворов это оказывается невозможным; для этого надо было бы располагать определенными данными об их прежнем состоянии, так например о предшествовавшей химической обработке и возникших при этом физических изменениях. Растворы, к которым прямо приложимы термодинамические законы — кристаллоидные растворы (молекулярно-дисперсные системы). К коллоидным растворам нельзя непосредственно применять упомянутые законы термодинамического равновесия.

Не исключена возможность, что когда-нибудь удастся разрешить все эти вопросы на основе д и с п е р с и и и определенных связанных с ней зависимых явлений (адсорбции построенных атомов, ионов, молекул и т. д. на поверхности дисперсных веществ).

Пока это еще невозможно, в особенности в отношении таких органических коллоидов, как клей, желатина, гумми, протеины (белки) вообще, каучук, целлюлоза и т. д. Исходя из современных теорий относительности пространства и времени, вероятно удастся перейти от чисто временного или чисто пространственного определения коллоидного вещества к определению, согласно которому «коллоидным» будет считаться вещество, у которого степень накопления или отдачи энергии будет зависеть от «вынужденных состояний», имеющих характер сопротивления.

Грэм ввел еще два укоренившихся в коллоидной химии обозначения. Жидкие коллоиды он назвал з о л я м и, а выпадающие из жидких растворов коллоидные студнеобразные осадочные вещества — г е л я м и.

С точки зрения практики все светочувствительные материалы — коллоиды или по крайней мере образуют дисперсные системы с разрешимыми микроскопом (непосредственно видимыми) частицами. В фотографии очень важно безошибочное определение дисперсности, т. е. исследование, насколько 1) дисперсность непосредственно отражается на эфекте воздействия света и 2) насколько она косвенно играет роль при химических и физических реакциях.

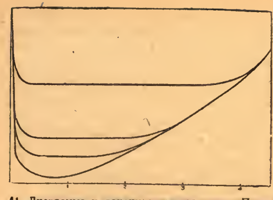
Наше последнее утверждение лучше всего можно пояснить указанием на фотографические эмульсии. При смешении эквивалентных растворов азотнокислого серебра и щелочной соли галоида, например KCl, KBr, KI, в силу обменной реакции:

$$AgNO_3 + KBr = AgBr + KNO_3$$

получаются при различных концентрациях следующие результаты:

| Эквнвалеитные коицентрацин (по отиошеиию к иормальному раствору) | Физическое состояние (дисперсиость) | Замечаиия |
|---|---|---|
| 0,0002 | Прозрачный гидрозоль | ↑ Увеличивающаяся дисперсность |
| 0,0004 | Т о ж е | |
| 0,0010 | Опалесцирующий золь | |
| 0,0025 | Мутная суспеизня | |
| 0,025 | Подвижная суспензия | |
| 0,25 | Хлопья, переходящие в рыхлую массу | |
| 0,75 | Хлопья, переходящие в творожную массу | ↓ Увеличивающаяся дисперсность |
| 1,50 | Хлопья, переходящие в крупинки | |
| 3,00 | Творожистая или рыхлая масса | |
| 4,50 | Творожнстая масса, переходящая в подвижиый гель | |

Дисперсность достигает минимума, или, другими словами, зерно (размер частицы) достигает максимума по мере возрастания кон-



41. Диаграмма к закону о дисперсности. По оси абсцисс отложена концентрация (применительно к нормальным растворам), а по оси ординат — дисперсность (в условных единицах). Лежащие одна над другой кривые относятся к галоидосеребряным эмульсиям с возрастающей концентрацией желатинового раствора.

центрации реагирующих веществ. Этот важный закон, касающийся нерастворимых продуктов реакции, был впервые высказан русским химиком П. Веймарном. Если величину зерна выразить обратной величиной, т. е. дисперсностью, то получится зависимость, изображения на рис. 41, на котором по оси абсцисс отложены концентрации регулирующих веществ, а по оси ординат отложены концентрациям степени дисперсности. Данные кривые относятся к галоидосеребряным эмульсиям, причем отдельные кривые отвечают различным концентрациям желатины. Приведенная зависимость соответствует комнатной температуре (120°С) и эквивалентным количествам реагирующих веществ. Изменение температуры или избыток той или иной составной части меняет результат. На рисунке особенно отчетливо видно влияние так называемых з а щ и т н ы х коллоидов. В качестве защитного коллоида действует упомянутая выше желатина. При возрастающей концентрации желатинового раствора получающаяся дисперсность становится все в больших пределах независимой от степени концентрации реагирующих составных частей, т. е. остается постоянной в пределах все более расширяющейся области концентрации.

В пределах этой области ч и с л о зерен в единице об'ема также большей частью постоянно; то же относится и к средней в е л и ч и н е зерна. Если же при сохранении той же концентрации реагирующих веществ меняется концентрация желатины, то для одного же количества галоидного серебра величина зерна резко меняется.

Такова основная зависимость между галоидосеребряной эмульсией и желатиной. Дальнейшие вариации можно систематически получать, меняя температуру и различно дозируя избыток одного из реагирующих веществ. В эмульсиях с проявлением берут избыток растворимого бромида, который оказывает растворяющее действие на бромистое серебро, усиливающееся при повышении температуры.

#### Фотографические эмульсии

Мы не предполагаем описывать здесь технику приготовления эмульсий, отсылая читателя к соответствующим подробным руководствам по фотографии. Светочувствительные препараты галоидного серебра, приготовленные различными способами и име-

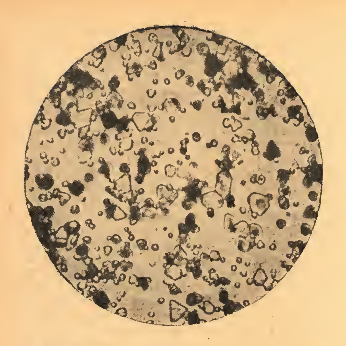
ющие общий технический термин — эмульсии, представляют суспензии серебряных солей в защитной коллоидной среде. Различаются два основных класса эмульсий:

*Эмульсии, в которых галоидное серебро образуется в присутствии избытка азотнокислого серебра.* Сюда относится так называемый «мокрый коллодион», еще и до сих пор часто применяющийся в фотомеханической репродукционной технике. К этому же классу относятся коллодионные эмульсии, а также большинство желатиновых эмульсий для дневной печати. Избыток растворимой соли серебра действует в первую очередь как химический сенсибилизатор, поглощающий галоид.

*Эмульсии, в которых галоидное серебро образуется в присутствии избытка растворимой галоидной соли.* Сюда относятся позитивные и негативные желатиновые эмульсии, применяемые с проявлением. Эмульсии с проявлением для позитивного способа состоят главным образом из хлористого серебра или смесей хлористого серебра с бромистым и имеют очень мелкое зерно. Условия, играющие роль при выпадении осадка, уже изложены нами выше. Дальнейшая обработка эмульсии в процессе созревания не имеет здесь большого значения. Чрезвычайно важные в фотографии негативы эмульсии содержат бромистое и иодистое серебро, причем процентное содержание последнего невелико.

Под «созреванием» понимается процесс в присутствии избытка бромида при сравнительно высокой температуре, поднимающий чувствительность эмульсии, т. е. ее способность получать почернения. Кроме того при созревании происходит рост зерен, что можно свести к тому, что зерна больших размеров растут за счет меньших зерен, более растворимых. Однако относительно крупные зерна высокочувствительных негативных эмульсий образуются главным образом за счет условий в начале осаждения твердой фазы, и необходимо помнить, что вообще невозможно без изменения начальных условий малочувствительную позитивную эмульсию превратить в высокочувствительную негативную.

Основное в процессе созревания, который при содействии аммиака может происходить и при более низких температурах (аммиак — растворитель галоидного серебра), повидимому заключается в комбинированном процессе частичной кристаллизации и начинающегося восстановления галоидного серебра в металлическое серебро в коллоидном состоянии так, что в эмульсионном зерне устанавливается определенная дисперсия коллоидного серебра. Следы коллоидного серебра могут действовать в качестве катализатора при фотохимическом разложении; во всяком случае Ф. Ф. Ренвик в последнее время пришел к выводу, что действие света в высокочувствительных эмульсиях повидимому ограничивается тем, что дисперсность уже до этого возникшего коллоидного серебра меняется вследствие его коагуляции в более крупные частицы, облегчающие отложение серебра при проявлении. Величина зерен галоидного серебра в эмульсии колеблется между ультрамикроскопическими размерами (меньше 0,1 μ) и диаметром в 3—4 μ (рис. 42).



**42.** Крупнозернистая структура высокочувствительной эмульсии

В позитивных эмульсиях размеры зерен обычно ультрамикроскопические, предельно — 0,2—0,5 μ; в негативных эмульсиях ультрамикроскопические зерна также встречаются, но главная масса зерен имеет уже микроскопические размеры и часто ясно выраженную кристаллическую форму. Хотя между средней величиной зерна и степенью чувствительности нет вполне определенной пропорциональности, все же можно утверждать, что *крупнозернистые эмульсии в общем чувствительнее мелкозернистых*. Основание для этого следующее: зерно галоидного серебра, подвергнутое действию света, при проявлении, т. е. при химическом восстановлении, превращается в металлическое серебро независимо от смежных эмульсионных зерен. Если даже допустить, что способность к проявлению сообщается большому и малому зернам одним и тем же количеством фотохимического продукта (скрытого изображения), то все же более крупное зерно больше привносит в конечный продукт, и почернение проявленного изображения при этом же количестве воздействующего света возрастает [1].

Это обстоятельство важно, но оно не единственное. Имеются кроме того следующие важные моменты: дисперсность галоидного серебра в желатине, дисперсность коллоидного серебра и ве-

[1] При этом предполагается известная концентрация световой энергии и именно в определенном отношении к *величине зерна*. Эта концентрация стоит в связи или с квантовым распространением света или с тем, что в больших зернах размеры „носителей чувствительности" возрастают.

роятно также дисперсность самой желатины; все это может оказывать влияние на зерно галоидного серебра. Далее необходимо заметить, что для определенных фотографических свойств (сенситометрических данных) эмульсии существенное значение имеет не только средняя величина отдельных зерен, но и соотношение количества зерен различной величины в одной и той же эмульсии. Бромосеребряные зерна негативной эмульсии — кристаллы правильной системы и принадлежат к диакисдодекаэдральному классу. Кристаллическая форма остается неизменной и при образовании иодобромистого серебра, в котором иодид участвует в определенном проценте, несмотря на то, что иодистое серебро само при температуре в 146° С переходит в кристаллы гексагональной системы. Иодистое серебро образует с бромистым при содержании в смеси не свыше 30% иодида гомогенные смешанные кристаллы правильной формы. Однако возможно, что в решетке галоидного серебра под действием иона иода возникает напряжение, обусловливающее двойное преломление, действительно наблюдаемое в эмульсиях на кристаллах иодобромистого серебра. Такие кристаллы имеют большей частью форму пластинок, т. е. это — плоские кристаллы с шестиугольным или треугольным очертанием и соотношением толщины к поперечнику обычно 1 : 14. Так как эмульсия, наносимая на твердую подложку, при высыхании и набухании может смещаться только в направлении, перпендикулярном к этой подложке, то эти плоские кристаллы ориентированы параллельно подложке. Средняя толщина высохшей негативной эмульсии на пластинках и пленках составляет около 0,02—0,04 *мм*. При набухании во время проявления толщина слоя возрастает в 5—8 раз.

### Коллоидное серебро и фотогалоиды

Коллоидальные растворы серебра, или гидрозоли, получаются или путем электрического распыления, например путем создания электрической дуги между двумя серебряными электродами, опущенными в слегка подщелоченную дестиллированную воду, или же путем замедленного химического восстановления, в особенности в присутствии какого-нибудь защитного коллоида, как например крахмального клейстера или желатины. Окраска полученного таким путем золя зависит от величины частиц и при увеличении их размеров принимает последовательно ряд цветов — желтый, красный, лиловый и синий. Цвет восстанавливаемого серебряного раствора можно регулировать добавлением различных количеств предварительно приготовленного золя. Чем больше прибавляется последнего, тем больше число зародышей, или кристаллизационных центров, на которых в итоге осаждается то же общее количество серебра; получающиеся в конце концов частицы будут таким образом мельче. Так как это обстоятельство играет роль в окраске изображений в позитивном способе, мы коснемся его подробнее позже. Добавление электролитов (соли, кислоты и щелочи) к гидрозолям серебра вызывает его коагуляцию, причем необходимое для этого количество электролита уве-

личивается в присутствии сильно действующего защитного коллоида (например в присутствии желатины).
Люппо-Крамер показал, что можно приготовить фотогалоиды, идентичные с полученными Кэри Ли, если гидрозоль галоидного серебра смешать с золем серебра и коагулировать смесь прибавлением серной кислоты; при дальнейшей обработке концентрированной кислотой получится упомянутый выше фотогалоид. Райндерс доказал, что кристаллы хлористого серебра, выкристаллизованные из аммиачного раствора в присутствии незначительных следов желатины, содержат желатину и очень быстро чернеют на свету. Если они образуются в присутствии коллоидного серебра, то возникают кристаллические фотогалоиды; однако в присутствии желатины коллоидное серебро не захватывается. Вышеприведенные факты не только обосновывают утверждение, что фотогалоиды — это коллоидальные продукты при соединении серебра и галоидного серебра, но и подтверждают все, что мы сказали о защитном действии желатины в эмульсии. Обычное осажденное бромистое серебро практически немедленно и до конца восстанавливается проявителем, даже без воздействия света. Почему же галоидное серебро, осажденное в желатине, противостоит восстанавливающему действию проявителя, если не имело места воздействие света? В соответствии с изложенными выше соображениями можно предположить, что желатина защищает возникающее бромистое серебро от воздействия зародышей коллоидного серебра; каждое зерно оказывается изолированным, и осажденная масса состоит из сложного геля, очень легко воспринимающего зародыши.
Учитывая влияние, оказываемое защитными коллоидами на склонность к коагуляции и слипание частичек серебра, следовало бы ожидать, что между изображениями, проявленными в коллодии и желатине, должны существовать различия. Действительно серебряное изображение, образующееся на мокром коллодионе путем восстановления растворимой соли серебра, сравнительно очень компактно и в отношении отражательной способности очень схоже со слоем серебра на зеркалах. Здесь именно сказывается влияние числа зародышей: при удлинение времени освещения (в результате чего образуется большее количество зародышей) во время проявления получаются значительно более теплые тона изображения. Серебряное изображение коллодионной эмульсии менее компактно, чем полученное на мокром коллодионе, но в свою очередь оно компактнее полученного на желатине. Серебряное изображение, нормально полученное на желатине путем восстановления зерен бромистого серебра довольно сильно действующими щелочными восстанавливающими веществами, окрашено в серый до черного цвет, если не считать адсорбцию из проявителя окрашенных продуктов окисления последнего. Доказано, что зерно такого изображения имеет пористую (губчатую) структуру. Если же при проявлении присутствует какой-нибудь растворитель галоидного серебра, то получается более компактный мелкозернистый осадок серебра. При применении сильно восстанавливающих средств их реакционная сила

стремится расщепить зерно галоидного серебра, и при восстановлении всей массы получается губчатое черное серебро. Когда же в некоторых случаях берут слабое или медленно действующее восстанавливающее вещество, реакция ограничивается поверхностью галоидного серебра и в результате получается компактный осадок, состоящий из более мелко распределенного серебра. Эти различные возможные модификации важны не только в отношении прозрачности и других качеств получающегося изображения, но играют существенную роль и при всей последующей обработке негатива различными химическими реактивами, т. е. в процессе ослабления, усиления и вирирования. В данном случае существенным моментом является адсорбция серебряным изображением красителей, затем адсорбция различных веществ из раствора фиксажа.

## Защитный коллоид

Значительные успехи фотографии на солях серебра были обусловлены тем, что сначала белок был заменен коллодием, а последний затем заменен желатиной. Все три перечисленные коллоида оказывают защитное действие. Белок, поскольку теперь его лишь изредка применяют, можно опустить. В настоящее время пользуются коллодием и желатиной, чаще всего последней. Коллодий — это нитрат нитроклетчатки, растворенный в смеси этилового спирта и этилового эфира. Служащая для приготовления коллодия нитроклетчатка должна свободно растворяться в эфирно-спиртовой смеси и кроме того обладать еще некоторыми постоянными свойствами; она должна быть умеренно нитрована, т. е. степень концентрации азотной кислоты или вернее азота не должна переходить определенной границы. Содержание азота в нитроклетчатке, грубо говоря, должно находиться в пределах от 10,2 до 12,8%. Незначительные колебания концентрации кислот (серной и азотной) и температуры при нитровании и различия в примененном хлопке могут давать нитраты хотя и одинакового состава, но сильно отличающиеся растворимостью, текучестью, стойкостью в отношении водной обработки и наконец очень непостоянными свойствами высушенного слоя пленки. В качестве растворителя берут обычно равные об'емы этилового эфира и этилового спирта (крепостью в 90% и ниже) и растворяют в нем коллодионную вату так, чтобы не оставалось практически различимого остатка. Коллодий для «мокрого» способа обычно содержит около 1,5% сухого нитрата и обладает вязкостью, превосходящей вязкость воды почти в 10 раз. Как в самом растворе, так и в растворителях в течение 12 час. не должно выпадать никакого осадка при приливании к ним спиртового раствора аммиачного азотнокислого серебра и оставлении смеси в темноте.

Полуторапроцентный раствор указанной выше вязкости обладает необходимой плотностью для свободного растекания по поверхности даже очень больших пластинок. После испарения растворителя жидкость должна быстро и легко застывать с образова-

нием прозрачного слоя. Последний должен обладать достаточно большой механической прочностью, чтобы мог свободно выносить последующую обработку; он не должен становиться роговидным или непрозрачным. Растворы коллодия, приготовленные из нитрата целлюлозы, недостаточно освобожденного от применявшихся при нитровании кислот, имеют тенденцию приобретать кислую реакцию и терять в вязкости.

Стойкость раствора при хранении зависит от многих причин, в том числе от температуры, воздействия различных химикалий, света и пр.

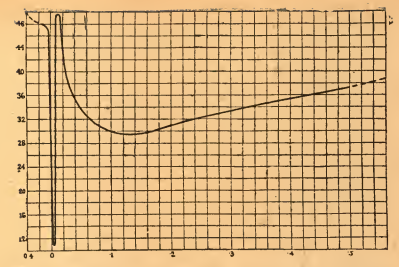
К коллодию можно добавить некоторое количество воды (большей частью до 5—6%), но чтобы не произошло выпадения осадка. Добавление большего количества воды сейчас же приводит к выпадению нитрата. Этим обстоятельством можно воспользоваться для очистки коллодия. Коллодионные слои, вначале хорошо пропускающие воду и растворенные вещества, очень мало набухают в воде, чем существенно отличаются от желатиновых слоев. Коллоидные защитные свойства коллодия выражены значительно слабее, чем желатины; его сопротивляемость действию кислот большая, чем действию щелочей. Сам коллодий не действует как химический сенсибилизатор, и потому в мокром коллодионе и в коллодионной эмульсии в роли сенсибилизатора должен фигурировать избыток азотнокислого серебра или органической серебряной соли.

Обыкновенная коллодионная эмульсия была вытеснена в фотомеханических работах мокрым коллодионом, а в обычных фотографических работах — бромосеребряными желатиновыми эмульсиями. Заслуживает упоминания введенная в 1882 г. Е. Альбертом ортохроматическая коллодионная эмульсия. Она представляет собой малочувствительную коллодионную бромосеребряную эмульсию, которая может быть превращена в высокочувствительную обработкой эозинатом серебра перед употреблением.

Значительно чаще в качестве основы, несущей светочувствительный материал, употребляется желатина. Это вещество добывается путем гидролиза из коллагена. Коллаген — главная составная часть соединительной ткани животных, костной ткани, сухожилий и хрящей. Он имеет следующий состав: 50% углерода, 18% азота, 25% кислорода, 7% водорода, но ни структурная химическая формула, ни молекулярный вес его твердо не установлены. Если продолжительное время варить его с неорганической кислотой, он гидролизует и образует смесь аминокислот, т. е. соединений типа $H_2N[R]COOH$.

Следовательно желатина — амфотерное соединение, т. е. она способна вести себя и как кислота и как основание. Как кислые, так и щелочные желатины сильнее гидратированы, чем нейтральные желатины, что передано на рис. 43. Изображенная на нем кривая передает набухание желатины в растворах кислот и щелочей различной концентрации.

То обстоятельство, что при добавлении неорганических (минеральных) кислот набухание проходит через максимум и затем снова уменьшается, Г. Проктер относит за счет концентрации водородных ионов. Важнейшие физические свойства желатины




**43.** Изображеине состояиия иабухання желатины при различиых коицеитрациях кислот и щелочей. По оси абсцисс ианесеиы коицеитрацни кислот и щелочей. Нулевой точке отвечает нейтральное состоянне. По оси ордииат ианесено количество граммов воды на 1 г желатииы

испытываются и расцениваются по концентрации в ней водородных ионов. Минимум вязкости раствор желатины имеет при pH = 4,7; этой же точке соответствует минимум гидратации или набухания, а химические свойства меняются на обратные при переходе через эту точку, называемую изоэлектрической точкой[1].

При pH > 4,7 желатина ведет себя как кислота и вступает в соединение с катионами неорганических и органических электролитов; при pH < 4,7 она имеет основной характер и соединяется с анионами.

В то время как состояние гидрозоля представляет интерес как для теоретика, так и для практика, производящего фотографические материалы, состояние гидрогеля имеет исключительное значение для производства фотографических светочувствительных слоев. Превращение

$$\text{гидрогель} \rightleftarrows \text{гидрозоль}$$

является легко обратимым, но не резко выраженным. Положение так называемых точек плавления и застудения зависит от метода определения. Точка плавления 10%-ного студня лежит на 2—8° выше точки застудения; ее положение зависит от примененной аппаратуры и условий испытания. У обычной продажной «твердой» желатины точка застудения 10%-го студня лежит около 27° C, у «мягкой» — около 22°. Разница между твердой и мягкой желатиной заключается только в количестве содержащейся в ней гидролизированной желатины,

[1] $pH = -\log \frac{1}{[H^{\cdot}]}$, где $[H^{\cdot}]$ означает коицеитрацию водородиых ионов.

так называемой желатозы. Если расплавить желатиновый студень при температуре около 70° и затем охладить до температуры студенения или еще ниже, то вязкость очень быстро нарастает, пока раствор опять не желатинируется и не застынет. Если же не нагревать выше этой температуры, то тенденция к желатинированию все время уменьшается. Степень гидролиза возрастает с увеличением температуры и от действия кислот и щелочей. При законченном гидролизе получается смесь аминокислот. Промежуточные стадии очень различны: β-желатина, метажелатина, желатоза, желатопептон. Рыбий клей (незастывающий клей), находящий большое применение в фотомеханических процессах и добываемый из мяса рыб, состоит из веществ упомянутого выше рода.

Желатина не растворима сколько-нибудь заметно в воде, но набухает в ней. Эфект набухания тем больший, чем выше температура воды; при дальнейшем повышении температуры достигается точка плавления студня и оба процесса — плавление и растворение — совпадают. Выше уже упоминалось о влиянии, которое кислоты и щелочи оказывают на набухание. Концентрированные растворы некоторых солей, как например сернокислый натрий, сульфиты, карбонаты и фосфаты, обусловливают значительное снижение набухаемости. Поэтому полезно вводить эти соли в больших концентрациях в проявитель в тех случаях, когда приходится работать при сравнительно высоких температурах, т. е. во всех тех случаях, когда важно воспрепятствовать сильному набуханию желатина. Однако действие этих солей временное; постоянное отвердение, или дубление, желатины достигается солями алюминия, хромовыми и железными солями.

Дубление выражается в уменьшении способности впитывать воду, в повышении точки плавления студия, равно как и в повышенной сопротивляемости гидролизу. Формальдегид, таннины и различные хиноны, а также хиноидные соединения оказывают то же действие. Идущий здесь процесс аналогичен дублению коллагена кожи. Таннины, как например дубильная кислота, образуют с желатиной нерастворимые соединения. Эта реакция иногда может быть полезна для обнаружения желатины, но в фотографии она лишена значения. Продукты окисления некоторых органических проявителей, например пирогаллола, дубят желатину и дают рельефные изображения, так как дубящее действие пропорционально силе реакции, в свою очередь связанной с энергичностью имевшего место светового воздействия. Дубящее действие квасцов надо отнести за счет их гидролитического расщепления на гидроокись коллоидного характера и свободную кислоту:

$$Al_2(SO_4)_3 + 3H_2O \rightleftharpoons Al_2O_3 + 3H_2SO_4$$

(вполне возможно промежуточное образование основных солей).

Квасцы и другие окислы дают с желатиной или комплексные продукты присоединения или продукты стехиометрического характера, что однако нельзя считать твердо установленным. Это



**44.** Образование сетки (ретикуляция) вследствие сильного набухания с последующей сушкой

утверждение доказано пока только в одном случае — при промывке желатины горячей водой. Действие, получающееся от введения названных выше соединений, специально используется в фотографии в тех случаях, когда материал должен противостоять действию сравнительно высоких температур и продолжительной или возобновляющейся химической обработки. Дубление формальдегидом (формалин — 40%-ный водный раствор формальдегида [$CH_2O$]) сводится вероятно к тому, что аминогруппы желатины оказывают на формальдегид промежуточное воздействие, и путем конденсации образуется нерастворимое соединение. Эффект дубления в 1—5%-ном растворе формальдегида сильно возрастает, если время от времени дубление прерывается сушкой.

Желатиновый эмульсионный слой на стекле или на другой твердой подложке отстает от нее по краям, когда подвергается воздействиям, при которых сильно набухает, но не растворяется. Фотографические эмульсионные слои, поливаемые на стекло или целлюлоид, предпочтительнее всего подслаивать тонким слоем задубленной желатины. Если оба слоя подвергнуть сильному набуханию или дублению, они оба испытывают различной величины напряжения в пределах эластичности студня, и в результате возникает своеобразная морщинистая структура характера сетки, называемая ретикуляцией (рис. 44).

Высушенный на воздухе желатиновый студень сохраняет от 8 до 16% влаги. Если сушка происходит в тонком слое на твердой подложке, как это имеет место у фотографических материалов, то аналогично расширению во время набухания при сушке получается сжатие. Это сжатие возможно только в направлении, перпендикулярном подложке, — свойство, сохраняющееся в отдельных кусках желатины после удаления их с основания. Скорость

сушки определяется отношением скорости диффузии воды в желатиновый слой к величине поверхности испарения. Поэтому на углах и ребрах сушка идет быстрее, постепенно снижаясь к средине пластинки или пленки, дольше всего остающейся влажной. За счет этого же обстоятельства приходится отчасти относить неравномерности, возникающие при проявлении большой пластинки.

Из этого следует практический вывод, что во всех случаях, когда фотографией пользуются для фотометрических целей (как напрнмер в астрономии), должны быть предусмотрены специальные меры предосторожности, позволяющие добиться равномерной сушки эмульсионного слоя вне зависимости от температурных атмосферных условий.

Получение нерастворимой желатины (т. е. дубление соединениями хрома) составляет основу очень важной группы фотографических и фотомеханических способов печати. К ним относятся: пигментные способы, в которых в желатине распределяется какой-нибудь пигмент, и введением бихромата калия слою придается светочувствительность; затем пигментная печать на рыбьем клее, вяжная в автотипии и другие фотомеханические репродукционные способы печати. Все эти процессы основаны на том, что свойства коллоидов претерпевают различные изменения, сводящиеся к восстановлению бихромата под действием света.. В пигментном способе участки изображения, бывшие на свету, не растворимы в горячей воде. В способе с рыбьим клеем коллоид становится нерастворимым и в горячей и в холодной воде в местах, где подействовал свет, и кроме того он „загорает" (противостоит последующему действию кислоты). В фотографии задетые светом участки коллоида вследствие уменьшения впитывающей способности допускают пропорционально большее налипание жирных красок. Добавим в заключение, что имеется еще группа непрямых способов печати — на солях хрома (они родственны озотипии), в которых окисел, обусловливающий нерастворимость коллоида, получается не прямым фотолизом а путем реагирования с серебряным изображением, получениым в качестве промежуточной стадии.

## Литература


Lüppo-Cramer, Kolloidchemie und Photographie, 2 Aufl., Th. Steinkopff, Dresden und Leipzig, 1921.

R. Ed. Liè Segang, Kolloide in der Technik, Bd. IX der Sammlung: Wissenchaftliche Forschungsberichte, Th. Steinkopff, Dresden und Leipzig, 1923.

R. Ed. Liesegang, Chemische Reaktionen in Galle-ten, 2, umgearbeitete Aufl. Th. Seinkopff, Dresden und Leipzig.

Garey, Lea, Kolloides Sieber und die Photohaloide, deutsche Ubersetzung mit Anmerkungen neu herausgegeben von Dr. Lüppo-Gramer, Th. Steinkopff, Dresden und Leipzig, 2 Aufl.

Wo. Ostwald, Grundriss der Kolloidchemie, Aufl., 1 Hälfte, Th. Steinkopfe Dresden und Leipzig.

P. P. v. Weimarn, Grundzüge der Dispersoidchemie, Th. Steinkopff, Dresden und Leipzig.

H. Freundlich, Kapillarchemie, 2 Aufl., Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H., Leipzig, 1922.

Friedrich Wentzel, Die photographisch-chemische Industrie, Bd. X der Sammeung Technische Fortschrittsberichte, Th. Steinkopff, Dresden und Leipzig 1926.

S. E. Sheppard, Gelatine in Photography, Eastman Kodak Research Laboratory Monographs, D. van Nostrand Company, New Jork.

A. P. H. Trivelli und S. E. Sheppard, The Silver Bromide grain of photographic Emulsions, Eastman Kodak Research Laboratory Monographs, D. van Nostrand Company, New Jork, 1921.

K. Arnold, Repetitorinm der Chemie, 16 Aufl., Leop. Voss. Leipzig, 1923.

Colloid Chemistry in Photography, by R. E. Slade in Third Report on Colloid Chemistry (British Association Report, published by H. M. Stationery Office London, 1920).

## Химические процессы при получении негатива и при его последующей обработке

### Проявление и проявители

Процесс получения негатива заключается в химической обработке галоидного серебра. Эта обработка называется проявлением и фиксированием.

Проявление, рассматриваемое с химической точки зрения, есть восстановительный процесс, в основном имеющий целью превратить серебро, находящееся в ионной форме, в металлическое. Проявителем, технически выражаясь, называют раствор, применяемый при проявлении. Способы проявления разделяют на а) физическое и б) химическое проявление.

Физическим называется проявление в тех случаях, когда изображение образуется из серебра, заимствуемого из проявительного раствора. Физическое проявление, применяемое в мокром коллодионном процессе и в некоторых других специальных способах печати, состоит в применении кислого восстановительного агента в соединении с раствором азотнокислого серебра. Обычно берут смесь азотнокислого серебра и подкисленного раствора железного купороса. Для подкисления служит уксусная кислота. Происходящая при этом химическая реакция течет согласно нижеследующему уравнению:

$$6FeSO_4 + 6AgNO_3 = 6Ag + 2Fe_3(SO_4)_3 + 2Fe(NO_3)_3$$

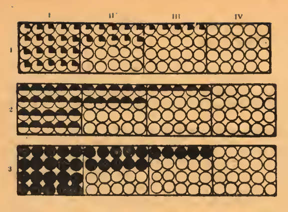
или, пользуясь способом обозначения, принятым в ионной теории:

$$\dot{Ag} + \ddot{Fe} \rightleftarrows Ag + \dddot{Fe}$$

Возникающее таким путем металлическое серебро действует усиливающим образом на скрытое изображение. Назначение органической кислоты — быть регулятором, или «буфером». Уксуснокислая закись и уксуснокислая окись железа разлагаются меньше, чем железные соли минеральных кислот, так как ионы двухвалентного железа при восстановлении заряжаются значительно медленнее. Эта реакция обратимая, но можно предполагать, что в присутствии органических кислот она идет только в сторону восстановления.

Химическое проявление, имеющее место в бромосеребряных желатиновых эмульсиях, состоит в применении концентрированных восстанавливающих веществ, превращающих освещенные зерна галоидного серебра в серебряное изображение.

При проявлении мокрого коллодия физическим проявителем изображение образуется на поверхности слоя. Ясно, что в начале проявления гораздо большее значение имеет возможность образования зародышей в отдельных зернах в тонком поверхностном слое, чем число зерен, получивших способность проявляться. При химическом проявлении изображение строится в толще слоя без всякого заимствования серебра из проявителя. Изображение образуется путем восстановления отдельных освещенных зерен гало-



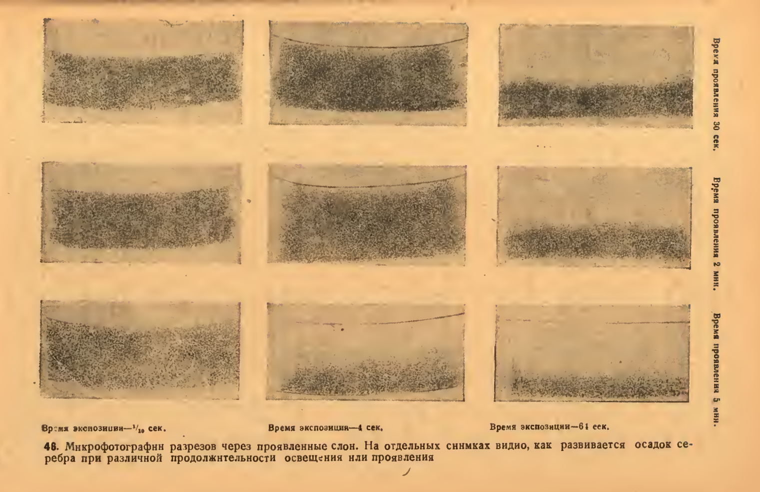

45. Схематическое изображение хода проявления, разбитого по плотности на 4 ступени: I, II, III, IV: 1) проявлено на четверть; 2) проявлено до половины; 3) проявлено полностью (по А. Ваткинсу)

иодного серебра. Поэтому число освещенных зерен, содержащихся в единице об'ема эмульсионного слоя, а также их величина имеет первостепенное значение для образования фотографического изображения. На рис. 45 схематически показано, как при проявлении растет изображение в результате увеличения размеров проявленного зерна. На рис. 46 даны 9 микрофотографических снимков разрезов через проявленный слой, полученных при различном времени экспозиции и при разной продолжительности проявления (Ф. Е. Росс).

Изучение отдельных стадий проявительного процесса с помощью микроскопа приводит к следующим результатам: при постоянной продолжительности проявления и возрастающем времени экспозиции увеличивается число проявленных зерен. Если сократить время проявления, то проявленнные зерна окажутся лежащими только на поверхности. При удлинении экспозиции проявлеными зернами наполняются и более глубоко лежащие участки слоя. При постоянном времени экспозиции и возрастающей продолжительности проявления число зерен, подвергающихся проявлению, вскоре достигает определенного предела; если продолжать проявление, то растут уже отдельные проявленные зерна тоже до известных пределов.

Из этого следует, что образование серебряного зерна протекает не моментально, а в зависимости от времени. Кристаллические зерна, симметричные сами по себе, редко сохраняют при проявлении прежнюю форму; обычно они претерпевают изменение. При долгих экспозициях, когда освещенные зерна оказываются на близких расстояниях друг от друга, у них возникает тенденция спаиваться друг с другом и давать образования второго порядка. Величина серебряных зерен варьирует в зависимости от характера эмульсии. Она колеблется от 0,0005 до 0,004 *мм* в поперечнике. Величина серебряного зерна играет большую роль при фотографировании спектров, а также при с'емке в астрономических работах, о чем будет более подробно изложено ниже.

При пользовании нормальными видами проявителей зерно галоидного серебра мало изменяется. Но некоторые проявители содержат вещества, являющиеся растворителями галоидного серебра. Эти вещества обладают тенденцией образовывать более мелкозернистый осадок серебра. Проявителем такого рода в особенности является *p*-фенилендиамин. Такие проявители представля-




**46.** Микрофотографии разрезов через проявленные слои. На отдельных снимках видно, как развивается осадок серебра при различной продолжительности освещения или проявления

ют промежуточную ступень между физическими проявителями, к которым добавлено серебро, и чисто химическими проявителями. Следует подчеркнуть, что различие между физическим и химическим проявлением в сущности является не чем иным, как вопросом фотографической терминологии.

### Классификация проявляющих веществ

Проявляющие, или восстанавливающие, вещества можно подразделить на неорганические и органические, или на кислые и щелочные, в зависимости от того, как реагирует данный проявляющий раствор.

В помещенной ниже таблице различные проявители расположены согласно указанной точке зрения. Их специфических свойств, сказывающихся при практическом пользовании, мы коснемся несколько позже.

| Кислые | | Щелочные | |
|---|---|---|---|
| Неорганические | Органические | Неорганические | Органические |
| Фтористое железо $FeFl_2$<br><br>Щавелевокисл. железо(щавелевокислая закись железа) $FeC_2O_4$ | Пирогаллол<br><br>Амидол | Перекись водорода $H_2O_2$<br><br>Гидроксиламин $NH_2OH$<br><br>Гидразин $N_2H_4$ (диамид) | Пирогаллол<br><br>Гидрохинон<br>*p*-аминофенол<br><br>*o*-аминофенол |

Некоторые из приведенных проявителей представляют только теоретический интерес. Таково например фтористое железо — неорганический проявитель, в слабокислом растворе проявляющий бромистое серебро. Вследствие присутствия в нем фтористоводородной кислоты, оно практически не применимо, но с точки зрения ионной теории представляет интерес. Согласно этой теории соли закиси железа большинства минеральных кислот, как например $FeCl_2$, $FeSO_4$, не могут вызывать проявления бромистого серебра, так как при наличии обратимой реакции:

$$\ddot{Fe} + \dot{Ag} \rightleftarrows \dddot{Fe} + Ag$$

будет преобладать реакция с низшим числом зарядов, в результате чего получается меньшая концентрация ионов серебра, образующихся из бромистого серебра. Поэтому не может образоваться пересыщенного раствора серебра, который мог бы вызвать образование осадка на скрытом изображении. Установившееся каким-либо путем удаление ионов окиси железа может ускорить течение реакции с более высоким числом зарядов. Так как фтористое железо более стойкое соединение, чем другие соли закиси железа, то вполне возможно представить связывание ионов

окиси железа ионами фтора. Так как фтористое железо, как и другие соли закиси железа, образуют комплексные ионы, то возможно, что фактически происходящая реакция течет следующим образом:

$$\overset{NaFeFl_3}{\swarrow}$$
$$FeFl_3''' + Ag \rightleftharpoons FeFl_3'' + Ag \text{ (металлич.)}$$

Подобное образование комплексных ионов яснее сказывается у щавелевокислого железа, обладающего проявительными свойствами только при избытке щавелевокислого калия. При этом образуется двойная соль $K_2Fe(C_2O_4)_2$, легко диссоциирующая следующим образом:

$$K_2Fe(C_2O_4)_2 \rightleftharpoons FeC_2O_4 + K_2C_2O_4.$$

Ион, обладающий проявительными свойствами, — это $Fe(C_2O_4)_2''$, его раствор красновато-желтого цвета в отличие от бледного желто-зеленого или даже бесцветного раствора обычных солей закиси железа. Реакция при проявлении следующая:

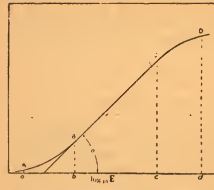
$$(C_2O_4)'' + Fe(C_2O_4)_2'' + Ag \rightleftharpoons Fe(C_2O_4)_3''' + Ag \text{ (металлич).}$$

Реакция обратима, добавление в этот проявитель больших количеств щавелевокислого железа тормозит восстановление бромистого серебра.

Щавелевокислая окись железа и бромистый калий в растворе отбеливают бромистое серебро и создают в некотором роде «выравнивание» фотографического проявления, что можно установить количественно.

### Количественное изучение процесса проявления

Перед тем как перейти к сложным органическим проявителям, чаще всего применяемым на практике, рассмотрим самый процесс проявления, т. е. *количественную* сторону его течения. Количественно всякая химическая реакция измеряется количеством вещества, превращающегося в единицу времени. Вещество, наиболее интересующее нас в нашем исследовании, — это серебро, переводимое из ионной формы в металлическое. Конечно обычные химико-аналитические методы не пригодны для наших целей. Кроме того этими методами нам не удалось бы получить интересующую нас зависимость между оптическими и фотографическими свойствами проявленного изображения. Выдающиеся специалисты пытались установить количественную зависимость между химическим эфектом, вызываемым воздействием света и активностью проявителя, с одной стороны, и оптическими свойствами проявленного изображения — с другой; но только Ф. Хертеру и В. Дриффильду удалось создать количественный метод удовлетворительной степени точности и установить связанную с этим методом терминологию. Отношение количества падающего на фотографическое изображение света к количеству пропущенного они назвали *непрозрачностью* фотографического




**47.** Типичная характеристическая кривая. Тангенс угла $\alpha$ соответствует фактору проявления $\gamma$

изображения, а обратную величину назвали **прозрачностью**. Десятичные логарифмы непрозрачиости называются **плотиостью** (почернением). Прозрачность измеряется **фотометрически**. В дальнейшем мы увидим, что плотность $D$, определениая как логарифм непрозрачности, схожа или даже идентична с показателем поглощения, о котором была речь при описании поглощения света. Хертер и Дриффильд экспериментально показали, что фотометрически промеренное почернение $D$ пропорционально массе $M$ металлического серебра на единицу поверхности негатива, т. е.

$$D = p \cdot M,$$

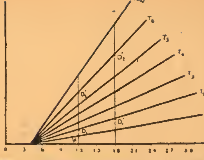
где $p$ — постоянный множитель. Эта зависимость повторно изучалась другими исследователями и оказалась правильной. Все же эта величина $p$ (так называемая фотометрическая константа) варьирует в известных пределах в зависимости от примененного проявителя. Возможно также, что и видоизменения способа проявления влияют на эту константу. Вышеназванные исследователи предложили также способ выражения фотографических свойств пластинки, состоящий в вычерчивании так называемой характеристической кривой светочувствительного материала. Для построения этой кривой величины почернений принимаются за ординаты, а десятичные логарифмы экспозиций (освещений) $E$ — за абсциссы, причем под $E$ понимается произведение интенсивности света на продолжительность экспозиции.

В кривой, изображенной на рис. 47, если не касаться пока части, лежащей вправо от максимума, можно ясно различить три отрезка; нижний отрезок, кривой, выпуклый относительно оси $\log_{10}E$, называется областью **недодержки** (к об'яснению мы вернемся несколько позже); средний отрезок, более или менее приближающийся к прямой линии, называется областью **правильных экспозиций**, а верхний отрезок, вогнутый относительно оси $\log_{10}E$, называется областью **передержки**. Пока мы не будем заниматься всей кривой в целом. Ясно, что для прямолинейного участка

$$\frac{dD}{d\log_{10}E} = \gamma$$

есть постоянная величина, где $\gamma$ определяет угол наклона прямолинейной части и называется **фактором проявления**. Для упомянутой области величина константы $\gamma$ является мерой фотометрического контраста негатива. При условии, что избирательное

поглощение не имеет места, γ является одновременно и мерой фотографнческого (т. е. получающегося прн копнроваиин с негатнва) контраста изображення.



48. Изображение зависимости между временем проявления и фактором проявления (γ)

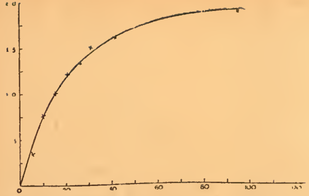
Значеиие γ растет с увеличеннем времеин проявлеиия, причем получающиеся значения стремятся к пределу; в предельном случае γ называется γ ∞ (гамма безкоиечностн). Когда γ достнгает этой велнчины, это означает, что достигнут предельный контраст до которого может быть проявлена даиная пластннка. В дальнейшем мы вернемся к выяснению смысла названных величин, сейчас же постараемся запомнить, что прямолннейная часть характеристической кривой может быть передана следующим уравненнем:

$$D = \gamma (\log_{10} E - \log_{10} i),$$

где Е означает экспозицию, γ — фактор проявлення нлн $\operatorname{tg} \alpha$ на рис 47, а $i$ — константу, а нменно велнчнну экспозиции, соответствующую точке, в которой продолженный прямолинейный участок кривой пересекает ось $\log_{10}E$. Хотя вышеприведенное уравнение можио рассматрнвать только как прнближенно правильное, все же оно полезно, так как передает основную зависимость между экспознцней н проявлением. Нетрудио видеть, что в пределах справедливости этого уравнения для разлнчных степеней проявлення $D = k \cdot \gamma$, если $E$ остается постояиным; прнведенное уравненне передает функциональную завнснмость между плотностью и степенью проявления. Выраженный таким образом закон есть закон постоянства отношення плотностей Хертера и Дриффильда. Из рис. 48 видио, как изменяются плотиости н величины гаммы со временем проявления в пределах действия этого закона.

Все характеристическне кривые пересекаются в одной точке осн $\log_{10}E$. Величина γ растет с увелнчением времени проявления, правда, чем дальше, тем медленнее, н накоиец достигает своего предельного значення, характернзующего даиный светочувствнтельный материал и в известных пределах зависящего от проявителя.

Еслн взять пластннкн, подействовать на них рядом возрастающнх в геометрической прогрессии экспозицнй, проявить с различной продолжительностью, измерить почериення и построить характеристические кривые, то из этих крнвых можно взять значение γ (илн плотности $D$) и их нанестн по осн ординат, а соответствующие значення времени — по оси абсцисс; в результате получнтся кривая рис. 49, на которой вндно, что γ (а следовательно н плотность) сперва очень быстро, а затем медленнее возрастает и наконец достигает предельного значения.



**49**. Изображение зависимости между временем проявления и плотностью. Крестики означают экспериментально полученные значения, а вычерченная кривая получена интерполяцией

## Скорость проявления

Путем некоторых упрощающих допущений можно вывести уравнение кривой, представленной на рис. 49. Допустим, что $D\infty$ — предельное значение плотности при определенной экспозиции — находится в определенной зависимости от общего количества способного к проявлению бромистого серебра, — допущение, отвечающее фактически наблюдаемым явлениям. Почернение, еще не проявившееся к определенному времени $t$, будет составлять $D\infty - D$, где $D$ означает плотность, уже успевшую проявиться за время $t$. Если далее принять, что прочие факторы проявления, т. е. концентрация проявителя, его диффузионная способность проникать в слой, его температура и т. д., постоянны, то мы вправе сказать, что скорость проявления $\frac{dD}{dt}$ пропорциональна проявленному почернению, т. е.

$$\frac{dD}{dt} = k(D\infty - D),$$

где $k$ означает константу.

Интегрируя, получим:

$$k = \frac{1}{t} \log \text{nat} \frac{D\infty}{D\infty - D} = \frac{1}{t} \log \text{nat} \frac{\gamma\infty}{\gamma\infty - \gamma},$$

откуда

$$D = D\infty(1 - e^{-kt})$$

или

$$\gamma = \gamma\infty(1 - e^{-kt}).$$

Эти уравнения удовлетворительно согласуются с экспериментально установленными фактами. Константа $k$ называется **константой скорости** проявления.

Наша кривая годится в особенности для таких проявителей, как щавелевокислое, фтористое и лимоннокислое железо, однако в пределах ограиичениой области. А Нитц показал, что эмпирическое видоизменение выведеииого уравнения, а имеиио:

$$\frac{dD}{dt} \doteq \frac{K}{t}(D_\infty - D)$$

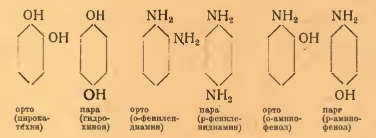
или после интегрирования

$$K(\log \operatorname{nat} t - \log \operatorname{nat} t_0) = \frac{D_\infty}{D_\infty - D}$$

охватывает бо́льшую область. Константы $k$ и $K$ пропорциональиы активному количеству восстаиавливающего вещества. Для уточнения этого поиятия нужно подробиее разобрать состав оргаиических щелочиых проявителей, а также функции отдельных составляющих частей.

### Щелочные проявители

Обычиый проявляющий раствор состоит из органического восстанавливающего вещества, щелочи, а также сульфита щелочиого металла; приводим типичный состав проявителя:
пирогаллол в качестве восстанавливающего вещества;
углекислый иатрий в качестве щелочного ускорителя;
сернистокислый натрий (сульфит натрия) как средство против образования пятен;
вода в качестве растворителя.
Оргаиический восстаиовитель — это эфективио действующее восстанавливающее вещество; оргаиические проявители по преимуществу — производные ароматического ряда, а именно лишь орто- и парадифенолы, диамины- и аминофенолы. Нижеследующее сопоставление этих соединений иллюстрируют орто- и парарасположеиия в молекуле:




Вместо беизольного кольца может присутствовать иафталиновое, а также разные другие радикалы, в результате чего свойства проявителя отчасти изменяются. Причина, почему структура органического проявляющего вещества имеет такое существениое зиачеиие, точно неизвестна. Предполагают, что она заключается в

трудности образования метахиноидных продуктов окисления. Гомолка нашел, что симметрический триоксибензол не обладает проявляющими свойствами, в то время как его триметиленовое производное обладает проявляющими свойствами

OH — OH — OH (кольцо) | OH, $H_3C$, $CH_3$, HO, OH, $CH_3$ (кольцо)

Не проявляет — Проявляет

Названный автор сводит это к тому, что имеются причины, препятствующие следующему таутомерному превращению:

OH, HO, OH (кольцо) $\rightleftarrows$ O, $H_2$, $H_2$, O, O, $H_2$ (кольцо)

Теперь перейдем к роли щелочи. С возрастающей концентрацией щелочи, или правильнее выражаясь, с увеличением концентрации гидроксильных ионов OH′, скорость проявления возрастает до некоторого максимума. Повидимому это происходит по той причине, что прежде всего имеет место перегруппировка таутомерного равновесного состояния:

$H_2$, O, O, $H_2$ (кольцо) $\rightleftarrows$ OH, OH (кольцо)

а именно направо (кетонная форма → энольная форма); второй причиной могло бы быть образование ионизированных солей восстанавливающего вещества; например в случае гидрохинона будем иметь:

OH, OH (кольцо) + NaOH, NaOH $\rightleftarrows$ O′ ... $\dot{Na}$, O′ ... $\dot{Na}$ (кольцо) $+ 2H_2O$

причем ион $C_6H_4O_2''$ и есть восстановитель.

С этой точки зрения восстанавливающие вещества — это псевдокислоты (с очень малыми константами диссоциации), дающие

сильно диссоциированные соли (Ганц). Константы диссоциации различных проявителей известны.

Другое допущение исходит из того, что все восстанавливающие вещества действуют в результате разложения воды:

$$R + H_2O = RO + 2H,$$

причем фактически восстановителем является водород, именно — активированный водород, концентрация которого обратно пропорциональна концентрации ионов водорода или прямо пропорциональна концентрации гидроксильных ионов, согласно следующему изображению равновесия:

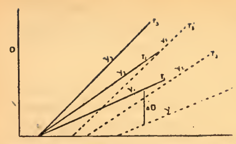
$$\dot{H} + OH' \rightleftarrows H_2O.$$

Если принять, что восстановление идет за счет атомного водорода или сводится к его промежуточному воздействию, то легко себе представить, что фактор интенсивности химического превращения, имеющего место при проявлении, иными словами, химический восстановительный потенциал восстанавливающего вещества, можно рассматривать как атомное сжатие водорода. На основании этого представления можно установить классификацию проявителей по их восстановительным потенциалам, которые эквивалентны степени атомного сжатия водорода[1]; последнее же при соответствующих условиях может быть вызвано в водных растворах. Эти условия связаны определенным образом с концентрацией активных ионов, а также с концентрацией свободной щелочи (гидроксильных ионов). Мы не располагаем до настоящего времени таким знанием состояния органических проявляющих веществ в растворе, чтобы определенно ответить на все эти вопросы.

## Роль сульфита

Все применяемые в качестве проявителей восстанавливающие вещества имеют в щелочном растворе свойство или, вернее, тенденцию сильно поглощать кислород воздуха, образуя при этом окрашенные продукты окисления сложного состава, большей частью желтоватого или коричневого цвета. В результате этих окислительных процессов не только очень быстро убывает восстановительная способность проявителей, но кроме того и желатина становится пятнистой (окрашенной), — в результате получаются плохие негативы. Сульфиты щелочных металлов, как например $Na_2SO_3$, введенные в фотографическую практику Беркелеем, в значительной степени препятствуют возникновению указанных недостатков и дают возможность получения неокрашенных негативов. Об'яснение этого эфекта пока еще достаточно твердо не установлено. Раньше считалось, что здесь происходит главным образом окисление сульфита в сульфат, но оказалось, что сульфит вступает в реакцию с первичными продуктами окисления вос-

[1] Допускаемое нами у атомов водорода сжатие можно представить себе подобным сжатию газа.



**50.** Изображенне влияння бромида на характернстическую кривую светочувствительного материала. По оси абсцнсс нанесены значення log 10 *E*, а по оси ординат почернения — *D*. Сплошные лннни соответсвуют проявителю, пунктирные бромированному

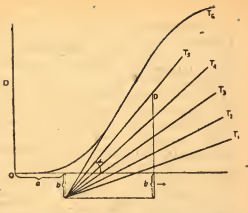
станавливающего вещества (эти продукты окисления имеют характер хинонов и действуют в свою очередь с образованием комплексных конденсационных продуктов); при этом образуются производные первоначального восстанавливающего вещества, в соединении с которыми сульфит приобретает восстанавливающую силу. У гидрохинона, первичным продуктом окисления которого является хинон, сульфит и хинон взаимдействуют друг с другом, образуя гидрохинонсульфат. Следует отметить, что первичные продукты окисления проявителя в присутствии щелочи, т. е. гидроксильных ионов, очень не стойки. Одновременно как будто бы происходит восстановление сеединений хиноидной структуры, а также замещение гидроксила в других молекулах. В результате этих реакций в щелочных растворах проявителей при восстановлении отнюдь не получается действительно равновесных систем. Так как сульфиты отчасти растворяют галоидное серебро, иодистое почти не растворяют, бромистое немного, а хлористое довольно обильно, то можно согласиться с допущением, что сульфит создает условия полуфизического проявления, накладывающегося до известной степени на обычное химическое проявление. Это явление мало сказывается при проявлении иодобромистых эмульсий, чаще всего употребляемых в негативном процессе, и очень существенно в позитивном процессе, в котором участвуют хлоросеребряные и хлоробромосеребряные эмульсии. Далее, ввиду того, что сульфит гидролизуется в растворе, он аналогично карбонату действует как слабая щелочь.

### Замедленное проявление и действие бромида

Многие рецепты проявителей, в особенности рецепты с энергично действующими восстанавливающими веществами, содержат помимо самого восстанавливающего вещества, ускорителя (Akzelerator) и средства, предохраняющего от пятен (сульфита), еще небольшое количество з а м е д л и т е л я; в качестве такового обычно применяется бромистый калий. Применение растворимого бромида для замедления, а также для уменьшения образования «химической» вуали было известно еще до Хертера и Дриффильда, но эти исследователи первыми систематически показали закономерность действия бромида. На рис. 50 изображен процесс проявления как функция времени проявления в бромированном и небромированном проявителе.

Если мы сравним группу кривых, полученных при проявлении в разные промежутки времени, то обнаруживается следующее:

1) если бромид или растворитель галоидного серебра отсутствуют, то все кривые (или, вернее продолжения их прямолинейных участков, пересекают ось $\log_{10}E$ в одной точке (рис. 48); 2) в присутствии бромида в достаточной концентрации они пересекаются тоже в одной точке, но лежащей под осью $\log_{10}E$ (рис. 51).




51. Изображение смещения точки пересечения продолженных прямолинейных участков под ось $\log E$ при пользовании проявителем с добавкой бромида.

Влияние добавки бромида одинаковой концентрации различно для разных проявителей, но для каждого из них оно постоянно и характерно. Шеппард и Миз использовали это обстоятельство в целях сравнения различных проявляющих веществ в отношении силы их действия, т. е. в целях сравнения их восстановительных потенциалов. В каждом проявителе, после того как достигнута определенная концентрация бромида (для каждого проявителя различная), влияние бромида при одинаковой продолжительности проявления, как и при отсутствии бромида, сказывается в постоянной величине снижения плотностей прямолинейного участка характеристической кривой. Если мы обратимся к растворам с эквивалентными концентрациями восстановительных ионов, то оказывается, что можно установить, какая концентрация бромистого калия необходима для получения одинакового снижения плотностей. Чем сильнее должна быть концентрация бромистого калия, тем больше восстановительная энергия или восстановительный потенциал проявителя. А. Нитц усовершенствовал этот метод исследования и показал, что опускание (депрессия) точки пересечения характеристических кривых является наилучшим критерием для суждения о влиянии бромида.

Теоретически, на основании следующих соображений, более подробно изложенных автором в другом месте[1], можно установить функциональную зависимость между влиянием бромида и изменением восстановительного потенциала. Идя обратным путем, из концентрации бромида можно определить концентрацию свободных ионов серебра на основании обратимой реакции:

$$\dot{Ag} + Br' \rightleftarrows AgBr,$$

т. е. из постоянства произведения растворимостей $(\dot{Ag})(Br')$. Уравнение процесса проявления как обратимой реакции показывает:

$$\dot{Ag} + R'' \rightleftarrows \dot{Ag} + R'.$$

[1] S. E. Sheppard и C. E. Kenneth Mecs, Untersuchungen über die Theorie des photographischen Prozesses, deutsch von H. Weiss, Halle a. S, W. Кnapp, 1912.

Следовательно при уменьшении концентрации ионов серебра величина частного от деления [R″] на [R′] должна увеличиваться, чтобы были соблюдены условия равновесия и чтобы при одинаково энергичном возникновении зародышей металлического серебра, т. е. при одинаковой экспозиции, образовался пересыщенный раствор серебра. Или иными словами: восстановительный потенциал восстанавливающего вещества при эквивалентной концентрации должен быть более высоким. Ввиду существования противоположной функциональной зависимости между восстановительным потенциалом и той концентрацией бромида, в результате которой при проявлении происходит одинаковое смещение назад точки равновесия (изображаемой на графике местом пересечения продолжения прямолинейных участков всех кривых), точка эта не зависит от времени проявления. Если за единицу измерения принять ту характеристическую концентрацию бромида, при которой в проявителе, выбранном в качестве нормального, возникает определенное смещение упомянутой точки пересечения, то можно составить таблицу, показывающую относительные энергии отдельных проявителей. Следующая таблица, по А. Нитцу, дает наиболее надежные данные из всех, которыми в настоящее время располагаем:

| Концентрация бромида | Относительная энергия |
|---|---|
| 1%-щавелевокислое железо | 0,3 |
| 2%-p-фенилендиамин, хлористоводородный (нещелочный) | 0,3 |
| 2%-p-фенилендиамин, хлористоводородный (щелочный) | 0,4 |
| 2%-гидрохинон (нормальный проявитель) | 1,0 (единица) |
| 2%-p-фенилглицин | 1 6 |
| 1%-гидроксиламин | 2,0 |
| 2%-толугидрохинон | 2 2 |
| 2%-p-аминофенол (хлористоводород) | 6,0 |
| 2%-хлоргидрохинон | 7,0 |
| 2%-диаметил-p-аминофенол (сульфат) | 10,0 |
| 2%-монометил | 20,0 |
| 2%-диаминофел | 30—40 |

Важно отметить, что с увеличением восстановительного потенциала проявителя растут значения $\gamma$. Правда, в этом отношении имеются некоторые отклонения, в настоящее время еще не об'яснимые.

Проявители имеют склонность вызывать вуаль, т. е. восстанавливать также и неосвещенное бромистое серебро. Это обстоятельство не находится в ясной зависимости от восстановительного потенциала проявителя и как будто бы перекрывается различными другими факторами такого же или бо́льшего значения. С практической точки зрения важен факт, что недопущение образования вуали успешнее достигается бромидом, чем экспозицией.

### Время проявления и фактор проявления

При практическом проведении проявления приходится особенно беспокоится о достижении правильного контраста, измеряемого значением $\gamma$. Критерии правильного контраста мы обсудим позже. Один из методов получения правильного контраста базируется на фактах, разобранных в предыдущем отделе, и состоит просто в том, что проявление ведется при постоянной температуре в течение определенного времени, причем последнее может быть вычислено для заданной $\gamma$ из диаграммы для $\gamma$ и $t$, принимая, что работают с определенной эмульсией и определенным проявителем. Другой метод — это так называемое «факториальное проявление» по Ваткинсу; пользуясь им, можно прибегать к определению продолжительности проявления. Ваткинс опытным путем обнаружил, что для нахождения времени проявления, необходимого для достижения желаемого контраста, достаточно помножить на некоторый фактор время, потребное для появления первых следов изображения в участках ярких светов негатива (участки максимальной экспозиции). Численная величина фактора Уткинса для специального значения контраста $\gamma=1$ практически не зависит от природы эмульсии и от концентрации проявителя, но для различных проявляющих веществ фактор различен. Это явление поддается обоснованию с точки зрения химической кинетики. При равной функции скорости время, необходимое для того, чтобы вызвать некоторую заданную часть всей реакции, находится в определенном численном соотношении со временем, нужным для совершения другой части всей реакции. Время появления первых следов изображения — для того же самого наблюдателя и при одинаковых методах наблюдения — это есть время, необходимое для выявления определенного (малого) изменения плотности; такое изменение плотности называется величиной порога. В соответствии с нашими рассуждениями это время находится в определенной зависимости от времени, необходимого для осуществления другой, определенной части процесса проявления. В нижеследующей таблице указаны факторы для отдельных проявляющих веществ. Сильное отличие этих факторов друг от друга об'ясняется различными восстановительными потенциалами, свойственными этим проявляющим веществам. Проявители, имеющие малый фактор, обладают меньшей энергией, чем проявители с бо́льшим фактором. Уменьшение фактора Уаткинса для данного восстановительного вещества при добавлении в проявитель бромида согласуется с изложенным выше.

| Проявитель | Фактор Уаткинса |
|---|---|
| Гидрохинон | 5 |
| *P*-аминофенол | 16 |
| Метол | 30 |
| Диаминофенол | 60 |

### Температура проявителя

У всех проявителей при возрастании температуры проявление ускоряется, — степень этого ускорения варьирует у различных проявителей. Под температурным коэфициентом понимается отношение скоростей проявления при разности температур в 10° С; несколько значений температурных коэфициентов даны в следующей таблице:

| Проявитель | Темп. коэфициеит для разностности температуры в 10° С |
|---|---|
| Щавелевокислое железо | 1,6 |
| Гидрохинон | 2,4 |
| Пиро-сода | 1,5 |

У некоторых проявителей с низким восстановительным потенциалом, особенно у гидрохинона, при снижении температуры не только уменьшается скорость проявления, но одновременно повышается и период индукции. Этот эфект аналогичен эфекту, вызываемому бромидом при постоянной температуре.

Суммируя все изложенное, можно вывести следующие правила для руководства на практике: 1) Необходимо стремиться к правильной экспозиции, т. е. обращать внимание на чувствительность применяемой эмульсии. 2) Для достижения желаемой степени контраста следует проявлять при постоянной температуре по часам или пользоваться фактором Ваткинса; обычно принято добиваться контраста $\gamma = 1$; степень почернения при проявлении не следует определять визуальным путем, иначе часто получаются негодные негативы. 3) Если при с'емке неизбежна недодержка, то следует применять энергично действующий проявитель, замедленный однако прибавкой бромида (надлежащей концентрации) в целях предотвращения вуали.

### Процесс фиксирования

Фиксирование имеет целью удаление из пластинки или бумаги непроявленного галоидного серебра. Последнее растворяется известными веществами, причем образуются комплексные соединения. Растворимость галоидных солей серебра убывает в следующем порядке: AgCl, AgBr, AgJ. Чем меньше растворимость в воде, тем сложнее образующиеся комплексные соединения. Степень такой «комплексной сложности» определяется константой стабильности комплексного иона. Если обратиться к растворению бромистого серебра в тиосульфате натрия ($Na_2S_2O_3$), то, оказывается, процесс можно изобразить следующими реакциями:

а) $$2AgBr + Na_2S_2O_3 = 2NaBr + Ag_2S_2O_3,$$

или, выражаясь языком ионной теории,

$$Ag + S_2O_3'' \rightleftarrows AgS_2O_3';$$

б) $$Ag_2S_2O_3 + Na_2S_2O_3 = Ag_2S_2O_3 \cdot Na_2S_2O_3,$$

или

$$AgS_2O_3' + S_2O_3'' \rightleftarrows Ag(S_2O_3)_2''';$$

c) $$Ag_2S_2O_3 \cdot Na_2S_2O_3 + Na_2S_2O_3 = Ag_2S_2O_3 \cdot 2Na_2S_2O_3$$

или

$$Ag(S_2O_3)_2''' + S_2O_3'' \rightleftarrows Ag(S_2O_3)_3^{V}.$$

При возрастающей концентрации гипосульфита образуется большее число комплексных ионов.

Стабильность комплексного иона

$$Ag(S_2O_3)_2'''$$

определяется частным

$$K = \frac{[\dot{Ag}]\,[S_2O_3'']^2}{[Ag(S_2O_3)_2''']}.$$

В приведенной ниже таблице собран ряд таких величин.

Стабильность комплектных серебряных ионов

| Химическая формула | Ион | K |
|---|---|---|
| $Na_2Ag(S_2O_3)_2$ | $Ag(S_2O_3)_2''$ | 0,98 $10^{12}$ |
| $Na_4Ag(S.O_3)_3$ | $Ag(S_2O_3)_3$ | 3,45 $10^{13}$ |
| $NaAg(CN)_2$ | $Ag(CH)_2''$ | 0,11 $10^{22}$ |
| $NaAg(CNS)_2$ | $Ag(CNS)_2''$ | 0,6 $10^{9}$ |
| $Ag(NH_3)_2Br$ | $Ag(NH_3)_2''$ | 1,3 $10^{8}$ |

Из этой таблицы видно, что ион цианистого серебра наиболее стабильный. Этим пользуются в практике, применяя цианистый калий для фиксирования иодосеребряных пластинок, содержащих наименее растворимое галоидное серебро. Затем эта таблица показывает, что желателен большой избыток фиксажной соли, причем не следует однако фиксирующий раствор применять почти до границы насыщения [1].

### Степень фиксирования

Успешность процесса фиксирования определяется прежде всего тем, насколько глубоко в светочувствительный слой продифундировал гипосульфит и какое количество галоидного серебра растворилось из слоя. В этих вопросах можно ориентироваться, если отфиксировать фотографическую пластинку один раз слоем вниз, а второй раз слоем вверх, не размешивая и не качая фиксажной ванны. Когда пластинка обращена слоем вниз, для фиксирования ее требуется вдвое меньше времени, чем в обратном случае. При концентрациях фиксирующего раствора до 10% скорость фиксирования почти пропорциональна концентрации гипосульфита, и она быстро увеличивается при размешивании или покачивании

[1] Практически граница достигается, когда начинает образовываться сернистое серебро, что узнается следующим образом: листок фильтровальной бумаги, смоченной в фиксаже выставляется на воздухе на свет; если бумага почернеет, то раствор уже не годен.

раствора. На практике применяются более концентрированные растворы — до 30%; оказалось, что с увеличением концентрации время фиксирования уменьшается. Это наблюдается при концентрациях до 40%; при более высоких концентрациях время, необходимое для фиксирования, снова увеличивается. Наличие минимального времени фиксирования можно об'яснить тем, что с возрастанием концентрации фиксажа уменьшается набухание желатины. Фиксирование можно ускорить добавлением к раствору таких веществ, как аммиак, роданистые соли. Эти вещества усиливают набухание желатины; однако приходится следить за тем, чтобы желатина чрезмерно не размягчалась.

### Кислый фиксаж

Кислые фиксирующие растворы введены в 1889 г. А. Лайнером с тем, чтобы уже при фиксировании получить все те преимущества, которые давали кислые осветляющие растворы, обычно применявшиеся после щелочного проявления. Если к раствору гипосульфита добавить минеральной кислоты, то очень быстро выпадает сера; при добавлении органической кислоты это выпадение происходит гораздо медленнее. Лайнер нашел, что предварительная добавка к гипосульфиту сернистокислого натрия дает возможность прибавить значительное количество кислоты без разложения гипосульфита. Это защитное действие сульфита происходит повидимому от того, что он является продуктом обратной реакции:

$$\underset{\text{ион гипосульфита}}{S_2O_3''} + \underset{\text{ион водорода}}{\dot{H}} \rightleftarrows \underset{\text{ион бисульфита}}{HSO_3'} + \underset{\text{сера}}{S}$$

### Дубящие растворы

Во многих случаях, в особенности, если негатив предполагается подвергнуть дальнейшей обработке (например усилению или ослаблению) или когда приходится работать в условиях тропического климата, желательно *з а д у б и т ь* желатину. Временное дубление желатины (например на время проявления) достигается прибавлением в проявитель больших количеств нейтральных солей, как например сернокислого натрия ($Na_2SO_4$), что значительно уменьшает набухаемость желатины. Тот же результат дает введение в проявитель сильно концентрированных растворов сульфита и карбоната или сравнительно большого количества трехосновного фосфорнокислого натрия. Перечисленные средства имеют однако только *в р е м е н н о е* действие, и желатина снова набухает, как только соль отмыта и пластинка лежит в воде. *Д л и т е л ь н о е* отвердение, или *д у б л е н и е* (его обычно и имеют в виду) достигается купанием в растворе формалина (формальдегида) концентрацией в 1—5% или в растворе калиевых (или хромовых) квасцов. Дубление квасцами происходит в результате гидролиза квасцов и соединения образующейся гидроокиси, а возможно и основной соли, с желатиной. При избытке кислоты

дубление ослабляется. С другой стороны, для предотвращения слишком сильного гидролиза квасцов в растворе должно содержаться достаточное количество кислоты. При комбинировании кислого фиксирующего раствора с дубящими средствами, содержащими квасцы, указанное обстоятельство должно быть учтено. При избытке кислоты выпадает сера, при недостатке — квасцы. При пользовании некоторыми органическими кислотами, например лимонной, можно применять сравнительно большие количества квасцов в фиксирующем растворе, имеющем менее кислую реакцию, чем это требуется для подавления гидролиза сернокислого алюминия (в случае калийных квасцов). Причина такой стабильности заключается в том, что органические кислоты, в особенности многоосновные и содержащие гидроксилы, имеют тенденцию образовывать с алюминием комплексные молекулярные соединения. В результате этого эффект дубления квасцами сильно уменьшается и полученный выигрыш невелик. Поэтому, желая получить достаточно сильное дубление с помощью квасцов, лучше всего пользоваться отдельной дубящей ванной.

### Растворы для ослабления, отбеливания и усиления

Растворы для всех перечисленных в заголовке операций мы описываем совместно, так как между ними имеется известное сходство в смысле их применения в фотографической практике, а также потому, что процесс отбеливания (превращение серебряного изображения в способное восстанавливаться, но не растворимое в воде серебряное соединение) является первой стадией как процесса ослабления, так и процесса усиления.

**Несколько типичных ослабителей**

| Ослабитель | Химический состав | Серебро переводится в форму | Кем ослабитель введен |
|---|---|---|---|
| Железный купорос | $Fe_2(SO_4) + H_2SO_4$ | $Ag_2SO_4$ | — |
| Марганцевокислый калий (в кисл. растворе́) | $KMnO_4 + H_2SO_4$ | $Ag_2SO_4$ | Намиас |
| Хинон (кислый) | $C_6H_4O_2 + H_2SO_4$ | $Ag_2SO_4$ | Люмьер |
| Сернокислый церий | $Ce(SO_4)_2$ | $Ag_2SO_4$ | " |
| Персульфат аммония | $(NH_4)_2S_2O_8$ | $Ag_2SO_4$ | " |
| Щавелевокислое железо и KBr, с последующей обработкой фиксажем | $Fe_2(C_2O_4)_3 + KBr$ $(+ Na_2S_2O_3)$ | $Na_4Ag_2(S_2O_3)_3$ | Белицкий |
| Ослабитель Фармера: красная кровяная соль и гипосульфит | $K_6Fe_2C_{12}N_{12}$ $+ Na_2S_2O_2$ | $Na_4Ag_2(S_2O_3)_3$ | Фармер |

Термин фотографическое ослабление, по сути говоря, не совсем удачен, так как в этом процессе происходит окисление, по существу обратное проявлению, т. е. серебро частично переходит из металлического в ионную форму согласно следующей схеме:

$$Ag\ (\text{металл}) \rightarrow \dot{Ag}\ (\text{ион})$$

Имеется очень мало солей серебра, настолько растворимых в воде, чтобы их удаление было возможным путем простого солеобразования. Поэтому в большинстве ослабляющих растворов этот процесс разбивается на следующие этапы:

$$\text{Ag (металл)} \rightarrow \dot{\text{Ag}} \text{ (ион)} \rightarrow \text{Ag}X \text{ (нерастворимое)} \rightarrow (\text{Ag Z})\, X \text{ (растворимое соединение)}$$

т. е. нерастворимое серебряное соединение «фиксируется», и весь процесс ослабления является комбинацией окисления (отбеливания) и процесс растворения (фиксирования). Иногда оба указанные процесса протекают комбинированно, иногда последовательно друг за другом.

Ослабители не должны действовать на желатину, а также слишком быстро растворять серебро. Вследствие этого возможность применения азотной кислоты исключается. Также очень желательно, чтобы ослабители не давали на желатине пятен, не дубили ее и не слишком обесцвечивали изображение. Предыдущая приведенная нами таблица дает общий обзор важнейших ослабителей, а также указывает в форме какого соединения серебро переходит в раствор.

Р. Лютер делит ослабители следующим образом:

*Ослабители с непропорционально сильным действием.* У этих ослабителей из места наибольшего почернения удаляется относительно большее количество серебра (в процентах), чем из мест с более слабым почернением; к этой группе относится при определенных условиях персульфат аммония.

*Ослабители с пропорциональным действием.* Эта группа дает ослабление, в процентном отношении одинаковое для всех степеней почернения.

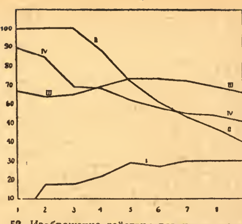
Сюда относится смесь перманганата калия с персульфатом аммония.

*Ослабители с непропорционально слабым действием.* К этой группе относятся ослабители, которые на места наибольших почернений действуют относительно слабее, чем на места наименьших почернений. Сюда относятся пермаганат калия и особенно ослабитель Фармера (рис. 52).

Задача усиления прямо противоположна задаче ослабления. В результате усиления почернение и контраст должны увеличиваться. Это выполнимо для недопроявленных негативов; если же они не додержаны на свету, то усиление мало может помочь делу. Исходя из этого положения, Г. В. Беннетт хорошо и с практической стороны целесообразно классифицировал негативы. Очень важно различать, подвергаются ли усилению коллодионные или желатиновые пластинки. Многие усилители при соответствующем видоизменении рецептуры пригодны для обоих типов эмульсий, но остается неизменным положение, что при переходе от мокрого коллодиона к желатине имеющие место реакции усложняются.

В то время как мокрый коллодион очень легко переносит последующую обработку, как например усиление, и он как бы прямо предназначен для этого, с желатиной положение уже значительно труднее, так как она обладает большей абсорбционной способ-

ностью («Zurückhaltungsvermögen), имеет тенденцию размягчаться и легко приобретает сетчатую структуру; кроме того строение изображения на желатине более сложно. Для того чтобы усиление хорошо удалось, пластинка должна быть хорошо отфиксирована и тщательно отмыта. Имеющие место при усилении процессы сводятся к: а) наращиванию серебра, черпаемого из физического проявителя, и б) „отбеливанию“ серебряного изображения с превращением его в галоидное или в железистосинеродистое серебро. За этими процессами обычно следует обратное проявление его в металлическое или превращение в сернистое серебро.



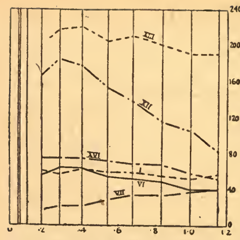

52. Изображение действия различных ослабителей (по Нитцу и Хьюзу). Действие различных ослабителей испытывалось на пластинках Seed 23 (Eastman Kodak Co). По оси абсцисс нанесены времена экспозиций, а по оси ординат — проценты уменьшения плотности негатива-оригинала под действием различных ослабителей. Кривые соответствуют следующим ослабителям: *I* — персульфат алюминия, *II* — фармеровский ослабитель, *III* — перманганат + персульфат, *IV* — перманганат.

Нижеследующая таблица представляет обзор имеющих при этом место реакций.

**Реакции при усилении**

| Отбеливающий раствор | Первичный продукт | Чернящий раствор | Конечный продукт |
|---|---|---|---|
| Хлорная ртуть[1] $HgCl_2$ | Хлористые серебро и ртуть ($AgCl \cdot Hg_2Cl_2$) | Аммиак | Комплексные серебряно-ртутно-аммонийно-хлористые соединения |
| Тоже | Тоже | Сернистокислый натрий $Na_2SO_3$ | $Hg(SO_3)_2Hg_3 + Ag$ (немного ртути и половина серебра выпадает в осадок) |
| „ | „ | Щавелевокислое железо | Ag : Hg (металл) |
| „ | „ | Щелочные проявители | Ag : Hg (металл) (немного серебра растворяется сульфитом) |
| Железистосинеродистый свинец | Железистосинеродистые серебро и свинец | Сернистый натрий | Сернистый свинец и сернистое серебро |
| Двухромовокислый калий, соляная кислота | Хлористое серебро и хромовокислая окись хрома | Амидол | Хромовокислые серебро и окись хрома |

[1] Таким же образом может быть использована бромистая или иодная ртуть.



53. Изображение действия различных усилителей. По оси ординат нанесены проценты увеличения плотности негатива - оригинала под действием различных усилителей (по Нитцу и Хьюзу)

Недостаток места не позволяет нам детальнее вдаваться во все химические реакции, имеющие место при усилении. Что же касается физических и фотометрических данных при усилении, то о них можно заметить следующее: если мы обычным способом (графически) изобразим фотометрически измеренные почернения испытуемой негативной полоски до и после усиления, то получим результат, аналогичный представленному на рис. 53. На последнем изображены результаты опытов, поставленных А. Нитцом и К. Хьюзом. Усилитель считается фотометрически пропорциональным, когда соотношения плотностей до и после усиления остаются постоянными. Часто однако наблюдается, что места наиболее слабых почернений фактически значительно осветляются в результате растворяющего действия примененного чернящего раствора. Но так как негатив предназначен для копирования на позитивном материале, имеющем иную цветочувствительность, чем глаз, то соотношение плотностей при усилении, полученное визуально-фотометрическим путем, еще не может дать правильного заключения для суждения о степени фотографического усиления. И действительно, обычно получаются различные результаты, так как в большинстве процессов усиления цвет серебряного осадка претерпевает изменения. Фотографический эффект какого-либо усилительного процесса можно определить следующим образом. Найти экспозицию, которая при копировании с усиленного негатива необходима для получения определенной плотности на данном позитивном материале, и сравнить ее с экспозицией, нужной для получения той же плотности с помощью неусиленного негатива. Если мы проделаем это для целого ряда освещенных полосок и каждый раз будем выводить отношение

$$\log_{10} \frac{E_1}{E_2},$$

которое мы назовем фотографической плотностью $D_p$, то полученную таким путем кривую плотностей позитивного материала мы сможем сравнить с визуальной (или фотометрической) кривой плотностей.

Отношение фотографического фактора проявления

$$\left(\frac{dD}{d \log_{10} E} = \gamma\right)$$

к фотометрическому, полученному описанным выше способом, называется цветным коэфициентом негатива.

Литература

The photographie researches of F. Hurter and V. C. Driffield, edited by W. B. Ferguson, London, Royal Photographic Society, 1920.
H. W. Bennett, Intensification and Reduction, London, Iliffe & Co.
A. H. Nielz, The Theory of Development, Monographs on the Theory of Photography, New York, D. van Nostrand Company (Rochester, Eastman Kodak Company)
S. E. Sheppard und C. E. Kenneth Mees, Untersuchungen über die Theorie des photographischen Prozesses, deutsch von Dr. H. Weiss, Halle a. S. W. Knapp, 1912.
Alfred Watkins, Photography its principles and applications, 2. Aufl, London Constable & Company Ltd, 1920.
A. H. Nielz und K. Huse, The Photographie Journal, 58, S. 81, 1918.
A. H. Nielz, Results of recent investigations on the theory of photographic development, The Photographic Journal, 60, 280, 1920.
E. Englisch, Photographisches Compendium. Stuttgart, F. Enke, 1902.
Vgl. auch die auf S. 118 angeführte Literatur.

## Химия позитивного процесса

### Эмульсии на солях серебра, для способа с проявлением

Приготовление позитива способами дневной печати насчитывает бо́льшую историческую давность, чем способы с проявлением. Ввиду того, что последние все больше прививаются, начнем наше изложение с них. Галоидосеребряные позитивные эмульсии и теоретически и практически ничем существенно не отличаются от негативных. Имеющиеся второстепенные отличия следующие:

1) иные технические требования, пред'являемые к позитивным эмульсиям,
2) преобладание хлористого серебра в качестве светочувствительного вещества.

**Позитивные эмульсии с проявлением**

| Название и применение | Светочувствительный материал | Чувствительность |
|---|---|---|
| Кинопозитивная пленка | Бромистое или иодобромистое серебро | $\frac{1}{10}-\frac{1}{30}$ |
| Бромосеребряная бумага для увеличений | Бромистое или иодобромистое серебро | $\frac{1}{30}-\frac{1}{50}$ |
| Бромосеребряные диапозитивные пластинки | Бромистое или иодобромистое серебро | $\frac{1}{50}-\frac{1}{100}$ |
| Газопечатные бумаги | Хлоробромистое или хлористое серебро | $\frac{1}{100}-\frac{1}{500}$ |
| Обыкновенные диапозитивные пластинки | Хлоробромистое или хлористое серебро | $\frac{1}{100}-\frac{1}{500}$ |

Техиические же требования следующие: а) меньшая чувствительность, б) более мелкое зерно серебряного осадка и в) возможность придавать снимку желательный цветной оттенок.

Позитивные эмульсии с проявлением можно классифицировать следующим образом.

Указанные значения чувствительности являются средними величинами и отнесены к белому свету. За единицу чувствительности принята светочувствительность малочувствительной негативной эмульсии. Когда количество хлористого серебра относительно возрастает, спектральная чувствительность смещается к фиолетовому и ультрафиолетовому концу спектра, из чего следует, что так называемую газопечатную бумагу, для изготовления которой идет хлоробросеребряная или чисто хлоросеребряная эмульсия можно без ущерба подвергать действию света, бедного лучами с короткой волной. Такой свет излучает например газовое пламя. Об изготовлении подобных эмульсий можно сказать следующее: 1) необходимые для приготовления эмульсии реактивы берутся в сравнительно слабых концентрациях, следствием чего является бо́льшая дисперсность (более мелкое зерно) галоидного серебра и меньшее количество серебра на единицу поверхности; 2) процессу созревания при изготовлении эмульсии отведена здесь более подчиненная роль.

Так например, можно указать, что в бромосеребряных бумагах на 100 см² поверхности бумаги приходится около 0,018 *г* Ag, а у негативных светочувствительных слоев на ту же поверхность приходится около 0,10 *г* Ag.

### Проявление позитивных эмульсий

Проявление позитивных эмульсий ни в физическом, ни в химическом отношении в принципе ничем не отличается от проявлений негативных эмульсий. Однако известные факторы, играющие второстепенную роль при проявлении негатива, приобретают большое значение при проявлении позитива и наоборот. Можно утверждать следующее: диффузия и абсорбция играют при проявлении позитивных эмульсий подчиненную роль; на первый план выступают чисто химические процессы; проявление скорее «физическое», так как серебро восстанавливается из раствора, вступающего во взаимодействие с проявителем. Последнее обстоятельство надо понимать не в том смысле, что применяется «вспомогательный» серебряный раствор; оно сводится к тому, что сульфит натрия растворяюще действует на мелкозернистое бромистое и хлористое серебро.

Проявители для позитивных эмульсий, особенно для хлоросеребряных, должны, как правило, обладать меньшей восстановительной энергией, чем проявители для негативных эмульсий, что достигается разбавлением и уменьшением количества щелочи. Отличие нормального проявления от замедленного, о котором мы говорим при негативных эмульсиях, существует и у позитивных эмульсий, причем то, что для позитивной эмульсии мы именуем нормальным проявлением, соответствует у негативной эмульсии

несколько замедленному проявлению. Замедленное проявление позитивной эмульсии дает очень мелкозернистые изображения, окрашенные в очень теплые тона. Если экспозицию и проявление бумаг рассматривать с количественной стороны, то внимание должно быть обращено не на количество восстановившегося серебра, а на его относительную отражательную способность.

Под плотностью в отраженном свете $D_r$ мы будем понимать следующее: сначала измеряем интенсивность света, отраженного от чистой (белой) бумажной подложки (следовательно сначала на бумаге нет еще никакого изображения), и обозначим ее через $i$; интенсивность света, отраженного от какого-нибудь участка изображения (после экспозиции, проявления и фиксирования), назовем через $i'$; тогда плотность в отраженном свете (отраженная плотность) определится выражением $\log_{10} \frac{i}{i'}$. Если принять $i' = 1$, то относительная отраженная плотность будет $D_r = \log_{10} \frac{1}{R}$ где $R$ означает отражательную способность.

В целях элиминирования зеркального отражения отражательную способность измеряют при угле падения, равном 45° (к плоскости бумаги). Кизер показал, что при соблюдении перечисленных условий получается характеристическое максимальное почернение, т. е. максимальное значение $D_r$ при возрастании экспозиции. Величина эта будет меньше, если, пользуясь одной и той же эмульсией, сделать ее поверхность матовой, примешивая к эмульсии например крахмал или иные вещества, увеличивающие рассеяние света. Позднее Ренвик сравнил плотность в отраженном свете с плотностью в проходящем

$$D_t \left( = \log_{10} \frac{1}{T} \right)$$ [1]

для одного и того же серебряного слоя и показал, что $D_r$ растет непропорционально $D_t$.

Опыт показывает, что $D_r$ независимо от $D_t$ достигает некоторого максимума, в то время как последняя величина продолжает расти с количеством серебряного осадка (рис. 54).

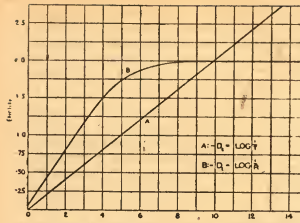
Влияние продолжительности проявления на характеристические кривые бумаги $D_r$ нанесены как ординаты по отношению к отдельным значениям $\log E$, соответствующим абсциссам) подробно и систематически изучено Нуттингом, Джонсом и Мизом. Эти исследователи нашли у бромосеребряных бумаг ясно выраженное уменьшение величины инерции, т. е. смещение характеристической кривой (рис. 55), — явление, очень ясно выраженное при замедленном проявлении негативных эмульсий (см. выше).

Величина $\gamma$ сначала увеличивается (причем $\gamma$ означает угол наклона прямолинейного участка кривой или угол наклона касательной в точке перегиба, если у кривой нет прямолинейного

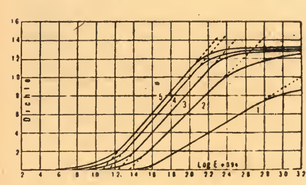
[1] $T$ означает прозрачность.

участка), когда уменьшается величина инерции, (абсцисса точки пересечения продолженной прямолинейной части кривой с осью $\log E$). Когда $\gamma$ достигает предельного значения, величина инерции может меняться дальше без одновременного изменения $\gamma$ и без увеличения максимальной плотности.

У наиболее чувствительных газопечатных бумаг (бумаг с проявлением) предел влияния продолжительности проявления наступает практически тогда, когда у характеристических кривых (соответствующих различным временам проявления) величина инерции начинает убывать без изменения $\gamma$; это не относится к кривым, соответствующим коротким временам проявления, имеющим несколько искаженную форму.




**54.** Кривая *A* изображает плотности серебряного осадка в проходящем свете, а *B* — эти же плотности в отраженном свете, обозначаемые через $D_r$. По оси ординат отложены плотности, а по оси абсцисс — серебряный осадок × *K*




**55.** Характеристические кривые бромосеребряной бумаги при различной продолжительности проявления: *1* — отвечает самому короткому, а *5* — самому продолжительному проявлению. По оси ординат отложены плотности

Помещаемые ниже константы, или характеристики, можно вывести из сенситометрически полученных кривых светочувствительных бумаг; они приблизительно характеризуют данный материал (см. табл. на стр. 129).

### Изменения окраски изображения при замедленном проявлении

Если сильно переэкспонировать бумагу с проявлением или диапозитивную пластинку и затем проявить в замедленном проявителе, то можно получить снимки различных тонов — от сероватозеленого до светлокрасного.

| Константа, или характеристика | Символ | Пояснение |
|---|---|---|
| а) Максимальная плотность в отраженном свете (отраженное почернение) | $D_{max}$ | Предельно достижимое почернение |
| б) Элемент контраста (градации) | $\frac{dD}{d\log_{10}J}$ | Дифференциальное частное (наклон) |
| в) Гамма | $\gamma$ | Специальное значение элемента контраста для прямолинейного участка; угол наклона касательной в точке перегиба |
| г) Широта | $L$ | Область интенсивности света, передаваемого прямолинейным участком характеристической кривой |
| д) Способность передачи деталей | $R$ | $\frac{10\,L}{S}$ |
| е) Вся область чувствительности | $S$ | Область всех интенсивностей света, вообще передаваемых ступенями почернений |
| ж) Нормальная экспозиция | $E_s$ | Величина экспозиции (выраженная в нормальных метро-секундо-свечах), необходимая для получения порога почернения под плотностью негатива $= 2{,}0$[1]. |

Различные оттенки об'ясняются прежде всего повышенной дисперсностью серебряного осадка. Экспериментально можно доказать следующее: если приготовить коллоидные золи золота и серебра и прибавить к ним различные количества заранее приготовленного «раствора зародышей» до того, как к солям металлов добавлено восстанавливающее вещество, то получаются различно окрашенные коллоидные металлические золи. Добавление раствора с зародышами соответствует освещению и обусловливает образование тем большего числа зародышей, чем больше добавлено содержащего их раствора. Такой же результат получается при увеличении экспозиции. Чем больше число зародышей, тем мельче отдельные образующиеся частички серебра, так как восстановлению подвергается все время одно и то же общее количество серебра.

Полученное таким путем окрашивание серебряного изображения не имеет практически большого значения: если же рассматривать его с точки зрения взаимоотношений между фотографией и коллоидной химией, оно представляет большой теоретический интерес.

[1] За нормальный (стандартный) источник света мы принимаем вольфрамовую лампу, потребляющую 1,25 W (ватта) на среднюю свечу в горизонтальном направлении (удельный расход $= 1{,}25$ W).

### Вирирование бумаг с проявлением и диапозитивов

Среди способов, имеющих целью изменение цвета проявленного изображения, практическое значение принадлежит прежде всего осернению и железистосинеродистому способу. При осернении серебро изображения переводится в сернистое серебро:

$$Ag \rightarrow Ag_2S$$

(окрашивание в коричневые тона, „сепия").

Этот же эфект можно получить, пользуясь одним раствором, дающим одновременно фиксирующую и дубящую ванну, как например квасцы и гипосульфит. При осернении под действием кислоты освобождается сера in statu nascendi; кислота возникает в результате гидролиза сернокислого алюминия, протекающего под действием гипосульфита при нагревании. Возникающие при этом реакции можно представить следующим образом:

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\,Na_2S_2O_3 = Al_2(S_2O_3)_3 + 3\,Na_2SO_4,$$
$$Al_2(S_2O_3)_3 + 3\,H_2O = Al_2(OH)_3 + 3\,SO_2 + 3S;$$

или

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\,H_2O = Al_2(OH)_3 + 3\,H_2SO_4,$$
$$Na_2S_2O_3 + H_2SO_4 = Na_2SO_3 + SO_2 + S$$
$$Ag_2 + S = Ag_2S;$$

кроме того вероятно имеют место промежуточные реакции значительно более сложного типа, ведущие к образованию политионовых кислот. Непрямые способы осернения основаны на том, что серебро сначала переводится в галоидное, например в бромистое или же в железистосинеродистое серебро, после чего под действием какого-либо растворимого сернистого соединения происходит дальнейшее превращение в сернистое серебро:

$$Ag + Br = AgBr,$$

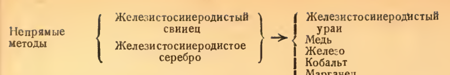
$$2AgBr + Na_2S = Ag_2S + 2\,NaBr.$$

За последнее время предложены способы вирирования, в которых участвуют селен и теллур; названные препараты применяются сами по себе или в комбинации с серой.

### Вирирование кровяной солью

Способы вирирования, основанные на взаимодействии серебра изображения с растворимыми железосинеродистыми соединениями, при котором образуются нерастворимые железистосинеродистые соединения различных металлов, допускают разные виды тонирования. Более употребительные методы можно классифицировать примерно следующим образом:

Прямые методы {
- Уран → краснокоричневый тон.
- Медь → то же.
- Железо → синий тон.




Образование железистосинеродистого серебра идет в общем по следующему уравнению:

$$4Ag + 4K_3Fe(CN)_6 = Ag_4Fe(CN)_6 + 3K_4Fe(CN)_6 .$$

Если вместо железосинеродистого калия (красной кровяной соли) применить растворимое железосинеродистое соединение какого-либо тяжелого металла или если за превращением в железистосинеродистое серебро следует дальнейшая обработка растворимой солью какого-либо тонирующего средства (например азотнокислым уранилом), то в результате получаются окрашенные железистосинеродистые соединения. Для замедления хода реакции и недопущения образования пятен на желатине необходимо некоторое количество органической кислоты или ее кислой соли, например лимонной или винной кислоты. Эти кислоты с соединениями тяжелых металлов дают комплексные молекулярные соединения (так например медь в присутствии винной кислоты не осаждается щелочью).

Сдерживающее действие кислоты регулируют соответствующим образом, поддерживая определенную концентрацию водородных ионов.

В связи с этим упомянем о новом способе, согласно которому серебряное изображение превращается в окрашенное (метод предложен А. Траубе. Серебро изображения отбеливающим действием красной соли и иодистого калия переводится в иодистое серебро, последнее же обладает способностью сильно адсорбировать основные красители. Окрасившееся изображение для растворения иодистого серебра переносится в крепкий раствор гипосульфита, после чего для удержания краски в желатине обрабатывается протравой (мордан). По другому способу вместо иодистого серебра получают железистосинеродистое серебро. Этот метод важен в цветной фотографии.

### Дневная печать на эмульсиях с солями серебра

Бумаги для дневной печати имеют в настоящее время, собственно говоря, больше исторический, чем практический интерес. Способы дневной печати основаны на применении хлористого серебра в присутствии избытка растворимой соли серебра; эти вещества суспендированы в белке, коллодии или желатине. Хлористое серебро обладает чрезвычайно мелким зерном: даже самые крупные зерна хлористого серебра с трудом различимы в микроскоп. В качестве избыточной растворимой серебряной соли может служить азотнокислое серебро, хотя чаще применяются серебряные соли органических кислот, как например молочнокислое, щавелевокислое, виннокислое и чаще всего лимоннокислое серебро. Эти ингредиенты играют роль химических сенсибилизаторов, поглощая хлор, выделяющийся при активировании светом хлористого серебра[1]. Цвет первоначально при копиро-

[1] В последнее время Ф. Вайгерт придерживается взгляда, что все серебро принимает участие в усилении образования зародышей.

зании возникшего изображения зависит от того, как велики образованные частички серебра, причем величина частичек связана с тем, как и при каких условиях происходило приготовление эмульсии, как произведена экспозиция, а также какова была интенсивность света при копировании и какова была влажность бумаги.

Последовательность цветов коллоидного серебра при возрастающих размерах частиц следующая:
желтый → красный → лиловый → синий.

В приводимой ниже таблице сопоставлены влияние интенсивности света, примененного при копировании, а также степени влажности бумаги на цвет, получающийся при прямом копировании на дневной бумаге:

| Интенсивность света | Влажность | | |
|---|---|---|---|
| | большая | средняя | малая |
| Большая | Яркозеленый мягкий тон | Темнокрасный | Пурпуровый |
| Умеренная | Темнокрасный | Пурпуровый | Более синий и холодный |
| Слабая | Пурпуровый | Более голубой и холодный | Яркосиний и холодный |

Оттенки цветов, получающиеся при копировании, претерпевают при фиксировании оставшихся неизмененными солей серебра определенные изменения, поэтому для получения приятно выглядящих снимков применяются золотые, платиновые и паладиевые виражи (а также виражи комбинированного состава). Под действием этих вирирующих растворов серебро замещается благородным металлом:

$$2NaAuCl_4 + 6Ag = 2Au + 2NaCl + 6AgCl.$$

Раздельные вирирующие и фиксирующие растворы постепенно заменяются комбинированными вираж-фиксажными ваннами. Химические свойства таких растворов интересны, но не имеют такого большого значения, которое оправдывало бы подробное их рассмотрение. Дальнейшее упрощение работы по этому способу состоит в применении самовирующихся бумаг. В этих бумагах золото добавлено в самую эмульсию (целлоидиновая), и после копирования их достаточно только обработать в фиксаже, чем и заканчивается процесс вирирования.

Названные способы основаны на активировании светом солей окиси и закиси железа. В цианотипном способе, часто применяемом при изготовлении светокопировальных «синек», пользуются бумагой, препарированной зеленой железоаммонийной лимонной солью.

Названное соединение приготовляется растворением в лимонной кислоте водной окиси железа и добавлением в раствор эквивалентного количества лимоннокислого аммония. При экспозиции на свету образуется соль закиси железа; изображение проявляется в растворе красной кровяной соли, при этом образуется турнбулева синь (берлинская лазурь):

$$3FeCl_2 + Fe_2(CN)_{12}K_6 = Fe_2(CN)_{12}Fe_3 + 6KCl.$$

Обычно красную кровяную соль смешивают с лимоннокислым аммонием и очувствляют бумагу этой смесью, так что под действием света сразу образуется синее изображение. Копии фиксируются промывкой в слабо подкисленной воде. Так называемая позитивная синяя печать (способ Гершеля — Пелле) отличается тем, что проявление изображения ведется в желтой кровяной соли. Последняя с неподвергшейся действию света солью окиси железа дает прусскую синь (железистосинеродистую окись железа), а на участках, где свет подействовал, — бесцветную железистосинеродистую закись железа, по удалении которой на бумаге остаются белые места.

*Способы платиновой печати* основаны на восстановлении действием света щавелевокислой окиси железа в щавелевокислую закись железа:

$$Fe_2(C_2O_4)_3 = 2Fe(C_2O_4) + 2CO_2.$$

Щавелевокислая закись железа взаимодействует далее с щавелевокислым калием, образуя двойную соль; последняя восстанавливает соль платины, прибавленную к щавелевокислой окиси железа до очувствления. Таким путем возникает металлическая платина.

В качестве платиновой соли применяют обычно хлороплатинит калия, т. е. двойное соединение хлористой платины и хлористого калия. Упомянутое выше восстановление можно выразить следующим уравнением:

$$6FeC_2O_4 + 3K_2PtCl_4 = 2Fe_2(C_2O_4)_3 + Fe_2Cl_6 + 6KCl + 3Pt.$$

Бумага проявляется погружением в раствор щавелевокислого калия, который растворяет щавелевокислую закись железа и, образуя, как указано выше, двойную соль, восстанавливает соединение платины. Здесь, так же как и в цианотипии, способ видоизменен в том отношении, что проявление происходит при самой экспозиции, для чего в наносимый на бумагу слой вводят все необходимые для проявления вещества. Платинотипные бумаги необходимо сохранять в очень сухом месте (для поглощения влаги из окружающей атмосферы применяется хлористый кальций),

иначе они очень быстро портятся. Снимки, получаемые по этому способу, очень красиво выглядят и отлично сохраняются, но ввиду большой дороговизны платины этот способ постепенно выходит из употребления. Шкала тонов, которая может быть им достигнута, велика, а «широта», равно как и максимальное почернение, сравнительно мала.

### Способы печати на хромированных коллоидах

Светочувствительность коллоидов (желатины или клея), обработанных растворимыми бихроматами, имеет в фотографии меньшее значение, чем светочувствительность коллоидов с серебряными соединениями. Фотохимическая реакция у бихроматов состоит в том, что окислы хрома под действием света образуют с желатиной водонепроницаемые соединения, способность которых набухать в холодной воде убывает пропорционально действию света. Кроме того эти соединения утрачивают способность растворяться в теплой или горячей воде. Пигментный способ (угольная печать) основан на применении очувствленного бихроматом желатинового слоя, к которому примешана очень тонко измельченная нерастворимая краска.

Некоторые из фотомеханических способов печати основаны на упомянутых выше принципах, а другие используют свойство желатины претерпевать под действием света некоторые изменения способности к набуханию (см. главу «Фотография в репродукционной технике»). «Растворовый способ» основан на том, что клей (желатоза), содержащий бихромат, под действием света может быть сделан нерастворимым в воде. В этом способе (называемом также автотипией) полутона оригинала сперва разлагаются на ряд рзличной величины точек, число которых на единницу поверхности зависит от различных обстоятельств. Полученный таким путем негатив копируется на клеевой слой, тонко нанесенный на медную или латунную пластинку и содержащий бихромат. Не подвергавшиеся эксплоатации места хромированного слоя можно смыть водой. В целях отвердения точек изображения пластинка «прижигается» и затем травится в растворе железного купороса, раз'едающего металл в местах, не защищенных никаким веществом от действия травящей жидкости.

Химия хромированных слоев пока еще недостаточно ясна. Исследования И. М. Эдера, Л. Люмьера, А. Зееветца и других позволяют высказать допущение, что совершающаяся под действием света реакция состоит в восстановлении бихромата или хромовой кислоты в окись хрома $Cr_2O_3$, которая вступает в реакцию с избытком бихромата или хромовой кислоты и дает таким образом хромовокислую окись хрома; относительно последней принимается, что она обусловливает «дубление»[1] коллоида. Упомянутые реакции можно изобразить следующим образом:

$$2H_6CrO_6 \xrightarrow[\text{Свет}]{} Cr_2O_3 + 6H_2O + 3O$$

$$Cr_2O_3 + CrO_3 = Cr_2CrO_6 = (3CrO_2).$$

[1] Под «дублением» разумеется перевод коллоида в нерастворимую форму.

Состав окислов хрома, оказывающих в этом способе дубящее действие на желатину, точно неизвестен, но ни в коем случае нельзя допустить, что они идентичны с нестойкой хромовокислой окисью хрома. Кроме того надо заметить, что существование последней вообще находится под вопросом. Во всяком случае важно следующее: нейтральные хроматы за исключением хромовокислого аммония не в состоянии сенсибилизировать желатину. Причина этого ясна: основное реагирующее на свет вещество — это или анион хромовой кислоты $Cr_2O_7''$ или триокись хрома, входящая составной частью в первую, а именно:

$$Cr_2O_7'' \rightleftarrows CrO_4'' + CrO_3 .$$

Раствор хромовокислого аммония при выпаривании отдает аммиак и образует двухромовокислый аммоний, так что упомянутое выше исключение только кажущееся:

$$2(NH_4)_2CrO_4 = (NH_4)_2CrC_7 + 2NH_3 + H_2O .$$

В общем же можно сказать, что нейтральные хроматы превращаются кислотами в бихроматы и, обратно, бихроматы щелочами переводятся в хроматы. Сенсибилизирующее действие солей калия, натрия, лития и аммония как будто не очень различно при условии одинаковой кислотности каждого очувствляющего раствора. Абней установил, что дубящее действие света обнаруживается даже после сравнительно короткого освещения. Это доказывает факт образования какого-то фотокатализатора, вступающего в дальнейшем в реакцию с избыточным бихроматом и желатиной,— таким путем возникает «задубленное» изображение

## Сенситометрия светочувствительных материалов и передача ступеней яркости

### Основные понятия о сенситометрии

Вначале под сенситометрией понималось только определение светочувствительности данного фотографического материала. Чувствительность определялась как минимальное количество световой энергии, при определенных условиях оставляющее видимый отпечаток (эфект) на светочувствительном материале. Для нахождения этого минимального количества энергии светочувствительный материал, закрытый градуированной шкалой полупрозрачных фильтров, освещался постоянным источником света. Ко времени появления бромосеребряной желатиновой пластинки широко применялся сенситометр Варнерке. Этот прибор состоял из стеклянной пластинки, покрытой окрашенными кусочками же-

латины различной толщины; в таком виде он представлял собой шкалу интенсивности (непрозрачности). Каждый отдельный участок поверхности был снабжен номером; он пропускал одну треть количества света, проходящего через смежный участок поверхности. В качестве приблизительно постоянного и равномерного источника света пользовались фосфоресцирующей табличкой (кружком), которая активировалась путем экспозиции (с расстояния в 2,5 *см*) от зажженной магниевой ленты. Табличкой пользовались через минуту после экспозиции. Имеющиеся в настоящее время в нашем распоряжении радиоактивные материалы конечно больше подходили бы для этого.

Сенситометр Чепман Джонса, служащий для испытания пластинок, устроен наподобие только что описанного прибора; при работе с ним пользуются обычным нормальным источником света. Сенситометры описанного рода могут быть использованы только при приблизительном изучении, так как уже давно обнаружено, что с их помощью невозможно получить удовлетворительные данные о количественной зависимости между экспозицией и возникающим изображением, а также о свойствах различных негативных и позитивных эмульсий правильно передавать соотношения яркостей, имеющихся в фотографируемом об'екте. Также приходится иметь в виду, что численные значения чувствительности, получающиеся в таких сенситометрах, как величины «порога» различимости, неточны. Количественные методы исследования действия света на негативный и позитивный материал, свободные от ошибок, впервые были предложены В. Абнеем. Для определения эфекта, производимого светом при увеличивающейся экспозиции, этот исследователь использовал фотометрические методы, производя измерения прозрачности негатива. Далее он определял отражательную способность позитивного изображения. Найденные величины прозрачности и отражательной способности он наносил как ординаты против логарифмов соответствующих величин экспозиций, откладываемых по оси абсцисс.

В 1890 г. Ф. Хертер и В. Дриффильд ввели понятие п о ч е р н е н и я (плотности) $D$ фотографического осадка, которое они определяли следующим образом:

$$D = \log_{10} \text{ непрозрачности } = \log_{10} \frac{I_0}{I} = -\log_{10} \text{ прозрачности } =$$

$$= -\log_{10} \frac{I}{I_0},$$

где $I$ означает интенсивность прошедшего, а $I_0$ — падающего света.

В пределах определенной области плотность (density) пропорциональна количеству серебра, восстановленному на единицу поверхности. Выше было указано, каким путем Хертер и Дриффильд получали «характеристическую кривую» фотографического мате-

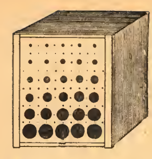
риала. Таким образом термин «сенситометрия» изменил свое значение, так как в настоящее время под ним мы разумеем точное количественное определение фотографических свойств негативных и позитивных эмульсий. Теперь, прежде чем перейти к изложению результатов исследований в этой области, кратко опишем некоторые сенситометрические приборы.

## Сенситометрические методы и аппаратура

Для точного сенситометрического исследования требуется, вообще говоря, следующее: а) нужен легко воспроизводимый источник света постоянной интенсивности; б) необходимо знать спектральный состав применяемого света; в) нужен прибор, с помощью которого можно получить достаточно длинный ряд точно определенных экспозиций (освещений); г) необходим фотометр для измерения плотностей (почернений) фотографического осадка. Коснемся каждого пункта в отдельности.

Применялись и в настоящее время применяются различные первичные и вторичные нормальные источники света. Хертер и Дриффильд пользовались спермацетовой свечой, с которой нельзя однако получить удовлетворительных по точности результатов. И. М. Эдер пользовался маленькой бензиновой лампой, похожей на амилацетатную лампу Гефнера. Шеппард и Миз пользовались ацетиленовым пламенем при постоянном давлении газа, питавшего горелку особой конструкции. Этот источник света оказался очень удобным, особенно если улучшить устройство горелки, используя новейшие технические достижения. Электрические лампы накаливания, применяемые в оптической фотометрии в качестве нормальных источников света, также удобны для наших целей, но требуют точного испытания и строгого контроля. Это вызывается тем, что интенсивность электрических источников света сильно меняется с напряжением, почему наиболее целесообразно питать их от аккумулятора. Спектральное распределение энергии электрических источников света зависит от температуры накала нити и других обстоятельств, в свою очередь зависящих от расхода энергии.

Так как фотографическая чувствительность в значительной степени зависит от длины волны примененного света, необходимо точно определить спектральное распределение энергии наших источников света. Дневной свет не имеет постоянного спектрального состава, поэтому ацетиленовый и вольфрамовый свет приходится при помощи определенных поглощающих фильтров (компенсационных фильтров) приводить к так называемому «искусственному нормальному дневному свету». Для специальных сенситометрических целей в ортохроматической и цветной фотографии этот искусственный дневной свет соответствующими светофильтрами делится на две или даже на три широкие спектральные области. Для точного установления влияния длины волны света на градацию и чувствительность материала пользуются различными спектроскопическими монохроматорами, спектрально разлагающими примененный свет.



**56.** Трубочный фотометр по Тейлору или по Муклеру и Спурге.

Изменения экспозиции достигаются многими способами и с помощью различных приборов. Экспозиция (освещение) есть фотометрическая величина, определяемая произведением количества света на продолжительность освещения. Следовательно $E = I \cdot t$, где $E$ означает экспозицию, $I$ — силу света и $t$ — продолжительность освещения.

Единицей количества света считается также то количество лучистой энергии, которое за единицу времени проходит через единицу поверхности, причем данная единица поверхности перпендикулярна к направлению распространения света. Бунзен и Роско на основании своих классических опытов над реакцией водорода с хлором под действием света, а также и на основании опытов с хлоросеребряными дневными бумагами заключили, что фотохимическое действие (фотохимический эфект) некоторого постоянного количества лучистой энергии $(I \,.\, t)$ всегда одно и то же. Если количество света $I$, падающее на плоскость с величиной $A$, расположенную нормально к направлению распространения света, обусловливает на этой плоскости равномерную освещенность, то количество света, проходящее за время $t$ через середину названной плоскости и вызывающее фотохимический эфект, составляет $A \,.\, I \,.\, t$. Если за время эксперимента величина освещаемой поверхности остается постоянной, то фотохимический эфект определяется произведением $I \,.\, t$, т. е. экспозицией. Абней нашел, что этот закон в отношении желатиновых эмульсий с проявлением выполняется не в полном об'еме. Если интенсивность света превысит известную величину, то для достижения определенной плотности необходимо непропорциональное уменьшение времени освещения или другими словами: при постоянной экспозиции $E$ фотографический эфект непостоянен. К этому обстоятельству мы вернемся позже, здесь же считаем нужным только отметить о существовании разницы в зависимости от того, происходит ли изменение экспозиции по шкале интенсивности или по шкале времени.

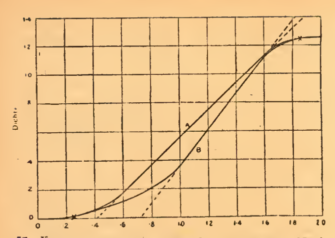
Ш к а л ы   и н т е н с и в н о с т и, состоящие из бумажных слоев различной толщины, могут самое большое служить только для приблизительных исследований, так как в бумажных слоях происходят сложные внутренние отражения света, а также потому, что подобные шкалы трудно воспроизводимы. Шкалы, приготовленные из пигментированной желатины, более пригодны, но установлено, что их трудно освободить от избирательного поглощения (они должны иметь абсолютно нейтральный серый тон). Такие шкалы имеют форму или ступеней или клина, т. е. в последнем случае они непрерывные. Другим типом ступенчатых шкал интенсивности являются трубочные сенситометры. Такой сенситометр состоит из ряда вычерненных изнутри труб, открытых с одного конца; поверхности отверстий находятся между собой в

определенном отношении, например, как $1 : \sqrt{2}$. Если все отверстия равномерно осветить, то на втором конце труб в результате получатся экспозиции, относящиеся друг к другу как площади отверстий (рис. 56).

Шкалы времени бывают непрерывные или прерывистые смотря потому, происходит ли экспозиция в один прием или прерывисто. Если в этих двух типах сенситометров со шкалой времени (на определенной ступени экспозиции) на светочувствительный материал попадают равные количества лучистой энергии, то фотографический эфект получается все же неодинаковый. Если данное количество света действует с перерывами, то получается меньший фотографический эфект, чем при непрерывном воздействии.

Для получения непрерывных шкал времени пользуются двумя способами: а) диск с рядом вырезов — щелей, величины которых находятся между собой в определенном соотношении, вращают с равномерной скоростью перед светочувствительной пластинкой, б) диск с одной единственной щелью вращается перед пластинкой с разными скоростями, в результате чего щель при вращении диска проходит перед определенными участками пластинки с различной скоростью. Отдельные интервалы времени выбираются таким образом, что их отношение друг к другу составляет например $1:2$, $1:\sqrt{2}$, $1:\sqrt[3]{2}$. Читателя, интересующегося более точными установками этого рода, отсылаем к литературе, приведенной в конце этого отдела.

Прерывистые шкалы времени получаются с помощью вращающегося секторного диска, т. е. диска с рядом переходящих друг в друга отверстий (щелей), величина которых возрастает в определенном отношении. Сенситометр такого рода предложил Клаудель еще в 1840 г. Хертер и Дриффильд в своих исследованиях пользовались таким же сенситометром. Они применяли диск с девятью вырезами, отверстия которых возрастали по направлению от периферии к центру. Шейнер использовал непрерывно расширяющееся отверстие, которое И. М. Эдер видоизменил в том отношении, что у него имелся ряд примыкающих друг к другу вырезов, поверхности которых относились друг к другу, как 1 : 1,27. Таким путем можно было добиться точного воспроизведения характеристической кривой. При точном изучении характеристической кривой позитивного материала, а также для более глубокого изучения теории передачи яркостей, можно рекомендовать пользоваться еще меньшим интервалом. Недостатки, свойственные прерывистым шкалам, сказываются при точных сенситометрических исследованиях. В особенности мешает так называемый, «эфект прерывистости» (Jntermittierungseiffekt). На рис. 57 изображено влияние этого эфекта, величина которого очень различна в зависимости от сорта пластинок. Она возрастает при относительном удлинении пауз при экспозиции и потому особенно сильно сказывается при коротких экспозициях. С другой стороны, Оденкранц нашел, что сенситометры со шкалой времени и прерывистым освещением дают более правильные прямолинейные участки характеристических кривых.




57. Характеристические кривые позитивного слоя: *А* — получено на сенситометре с непрерывной, а *В* — с прерывистой шкалой времени

### Зависимость между освещением и фотографическим почернением

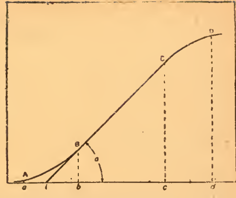
Понятие «плотность» (фотографическое почернение), т. е. выражение $\log_{10}O$, как мера фотографического эфекта действующей световой энергии полезно с двух точек зрения. С одной стороны, фотографическая плотность с известными ограничениями пропорциональна количеству серебра, восстанавливаемому на единице поверхности, причем сюда входят и некоторые последующие реакции, возникающие при проявлении; с другой стороны, известно, что измерение света, а следовательно и яркости, подчинено с точки зрения физиологической оптики закону Вебера-Фехнера, который устанавливает в определенных пределах функциональную зависимость между ощущением и раздражением, т. е. утверждает, что ощущение находится в линейной функциональной зависимости от логарифма физической интенсивности света, т. е. раздражения (это справедливо в определенных пределах). Ряд фотографических почернений (плотностей) возрастает в арифметической прогрессии, когда согласно нашему определению количество света возрастает в геометрической прогрессии, в результате чего создается впечатление равномерного перехода от света к тени.

Если допустить, что плотности, получившиеся в результате ряда экспозиций, возрастают пропорционально величине экспозиции, то градация пропущенного ими света казалась бы глазу негармоничной. Хертер и Дриффильд впервые указали, что такое соотношение наблюдается в негативе или диапозитиве в случае недодержки.

Практически дело обстоит следующим образом.

Сначала свет действует на пластинку таким образом, что плотность линейно растет с экспозицией, затем следует область экспозиций, в пределах которой плотность возрастает с логарифмом освещения. После этого плотность продолжает нарастать, дости-

гает некоторого максимума и наконец при дальнейшем росте экспозиции падает (область передержки, а затем обращения). На рис. 58 показана последовательность этих ступеней. Плотности нанесены как функции значений $\log_{10}E$, причем в основу положен закон Бунзена и Роско ($E = I \cdot t$). Было сделано немало попыток изыскать на основе физикохимических предпосылок простое уравнение, которым можно было бы математически выразить характеристическую кривую в целом или по крайней мере в области максимума. Положенные в основу предпосылки основаны на выведенных нами выше законах, количественно рассматривающих фотохимические реакции. В нижепомещенной таблице собраны наиболее важные из относящихся сюда формул; что же касается больших подробностей см. приводимую в конце отдела литературу.



58. Характеристическая кривая. По оси ординат отлжоены плотности, по оси абсцисс— значение $log_{10}E$

| Допущение | Диффереициальиая и иитегральиая форма уравиеиий (фуикции) | Замечаиия |
|---|---|---|
| Э д е р. Прииимается, что количество галоидиого серебра, получившего в едииицу времеии способиость проявляться, пропорциоиальио количеству оставшегося незатроиутым галоидиого серебра, а также иитеисивиости падающего света (закои иитеисивиости). | $\frac{dx}{dt} = kI\ (A-x)$<br>$D = D_m\ (l-e_{-kIt})$ | $D_m$ есть ордиията точки максимума, $\kappa$—отвечает положеиию этой точки иа оси абсцисс и таким образом является мерой чувствительиости. Указаииая фуикция ие вполне соответствуег действительным характеристическим кривым. |
| Х е р т е р и Д р и ф ф и л ь д. Прииимается, что количество галоидного серебра, получившего в едииицу времеии способиость проявляться, пропорциоиальио количеству поглощеииого света, а также количеству иезатроиутого галоидиого серебра. | $\frac{dx}{dt} = \frac{l-R}{b} I\,(-e^{-kx} - e_{-ka}$<br>$D = \gamma \log e\,[O-(O-l)\,e^{-bIt}$ | Фуикция имеет 3 параметра и дает кривые, хорошо совпадающие с кривыми, получеииыми эксперимеитальио. Одиако Р о с с показал, что здесь иет осиоваиий для примеиеиия закона поглощеиия.<br>Обозиачеиия в формуле: $\gamma$—фактор проявлеиия, а $O$—иепрозрачиость эмульсии в отиошеиии действующего света. |

| Допущение | Дифференциальная и интегральная форма уравнений (функции) | Замечания |
|---|---|---|
| **Росс.** Делается следующее допущение: а) зерна серебра распределяются на $n$ групп, причем каждая группа следует закону Эдера; б) количество серебра в каждом зерне одинаково; в) факторы чувствительности отдельных групп образуют геометрический ряд. | $\frac{dx}{dt}=kl\ (A-x)$ <br> $D=D_m\left[l-\frac{l}{n}\sum_{s=0}^{s=n-l} e^{-kr^s It}\right]$ | Эта функция для $D$ по сути является суммой уравнений Эдера. В формуле $D_m$ означает максимальную плотность, $n$ — число групп, $s$ — фактор чувствительности, $r$ — отношение групповых чувствительностей. Эта формула очень хорошо подходит для некоторых форм кривых; необходимо однако заметить, что сделанные допущения слишком формальны. |

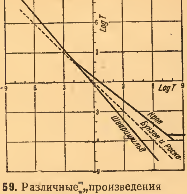
*Место перегиба характеристической кривой.* Ни одна из приведенных формул не учитывает ясно выраженного места перегиба характеристической кривой. Уравнения, учитывающие эту область, нуждаются в искусственных гипотезах ad hoc (одна такая гипотеза предполагает например, что существуют в одном случае «проявляемые», а в другом «непроявляемые» субгалоиды). Тот факт, что в результате удлиненного или усиленного освещения получается обращение изображения, согласуется с допущением, что при передержке освобождается избыток галоида (например брома). Этот избыток действует на поверхностное скрытое изображение и уменьшает проявляемость более энергично экспонированных зерен, причем галоид внутри зерна снова соединяется с первоначально образовавшимся металлическим серебром. Способность «акцепторов», т. е. веществ, поглощающих галоид, как например гидразинов, тормозить явление обращения согласуется с вышеприведенным допущением. В научной фотографии это место перегиба характеристической кривой имеет важное значение, когда дело сводится к прямому фотографированию интенсивных источников света, например солнца, искровых разрядов, молнии и т. д. Так называемый эффект Клайдена — обращение изображения при фотографировании молнии — есть повидимому нормальный случай обращения. В отношении других случаев обращения можно рекомендовать читателю работы В. Б. Банкрофта.

### Недостатки закона Бунзена и Роско

Практически обнаруживающиеся отклонения от закона Бунзена и Роско, по которому $D=f(E)$, причем $E=I\,.\,t$, значительно важнее, чем только что разобранное явление обращения. Шварцшильд считал достаточно экспериментально обоснованным следующее уравнение:

$$D=f\,(It^p)=(\int)(I^{\frac{I}{p}}t),$$

т. е. независимая переменная равна либо произведению силы света на время в степени $p$ либо произведению силы света в степени $\frac{1}{p}$ на время, причем $p < 1$ и меняется в зависимости от сорта пластинок. Е. Крон в отличие от этого установил, что $p$ тоже должно быть заменено функцией от $I$; он предложил следующую формулу:



59. Различные „произведения экспозиций“

$$E = it \cdot 10^{-a\sqrt{\left(\log_{10}\frac{I}{I_0}\right)^2 - 1}};$$

в которой $a$ и $I_0$ зависят от эмульсий. Для незначительных количеств света закон Крона идентичен с законом Шварцшильда, но существенно отличается от последнего при больших количествах света. На рис. 59 изображены различные «произведения экспозиции» («Expositionsprodukte»).

При допущении, что полученные Кроном результаты правильны, закон Бунзена и Роско хорошо выполняется для освещенностей от 0,001 до 1,0 *м/свеч;* как для больших, так и для меньших количеств света он теряет силу. Если же допустить, что правилен закон Шварцшильда, то закон Бунзена и Роско совершенно не выполняется, и отклонения от него для всех количеств света почти одинаковы. Ф. Е. Росс приводит следующий практический пример: допустим, что некоторая фотографическая плотность вызвана определенным количеством света и ту же плотность нам нужно получить при помощи в сто раз большего количества света; тогда, если принять, что $p = 0{,}83$, необходимое время экспозиции должно составлять $\frac{1}{2{,}4}$ продолжительности экспозиции согласно закону Бунзена и Роско.

Ренвик и другие исследователи показали следующее: если получить характеристическую кривую одной и той же пластинки один раз с помощью шкалы интенсивности и второй раз с помощью шкалы времени, то величины $\gamma$, полученные при одинаковой продолжительности проявления, относятся друг к другу таким образом, что их частное равно $p$, т. е. $p = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$ при условии, что выполняется закон Шварцшильда. Это утверждение нуждается еще в точной экспериментальной проверке.

### Фотометры и приборы для измерения почернений (денситометры)

Фотометры, специально предназначенные для измерения фотографических почернений, можно назвать измерителями почернений, или денситометрами. Хертер и Дриффильд использовали с этой целью фотометрическую скамью с двумя неподвижно монтированными постоянными источниками света и подвижной фо-

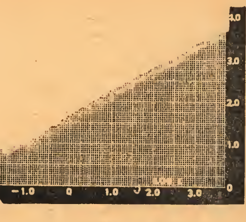
тометрической головкой (т. е. бунзенским жирным пятном с зеркалами), расстояние которой от источников света можно было менять. Один из источников света затемнялся при вдвигании измеряемой почерненной пластинки, при этом фотометрическая головка передвигалась до тех пор, пока жирное пятно исчезало. Почернение вычислялось согласно основному фотометрическому закону о квадрате расстояния. Ф. Ф. Ренвик и В. Б. Фергюсон значительно усовершенствовали этот метод, применив только один источник света и люммербродхуновскую фотометрическую головку. Для подробного ознакомления как с этим, так и с другими фотометрами отсылаем читателя к соответствующей литературе.

В научной фотографии фотометр то же, что в химии весы. Следует заметить, что получающаяся величина плотности $D = \log_{10} \frac{I_0}{I}$ в известных пределах зависит от принятого для измерения прибора и от условий освещения. Хертер и Дриффильд, занимаясь промерами фотографических негативов, основывались на законе Ламберта-Бэра о поглощении в гомогенной среде. Абней и Чепман Джонс подвергли этот взгляд критике и показали, что серебряный осадок является светорассеивающей средой. А. Кайе и позже Ф. Ф. Ренвик очень подробно исследовали этот вопрос; последний показал, что плотность, измеренная в направленном свете ($D_н$), отличается от плотности, промеренной с помощью рассеянного света $D_к$ (когда промеряемый негатив приводился в контакт с опаловым стеклом). Ренвик установил, что величина измеряемой плотности снижается из-за отражений, имеющих место между опаловым стеклом и пластинкой. Этих отражений можно почти избежать, создавая премежуточный слой из канадского бальзама между стеклом и негативом.

### Сенситометрия с помощью клиньев

Градуированные бесцветные (нейтральные) клинья применял уже Абней в фотометрии и в фотографической сенситометрии как средство для ослабления света при количественных измерениях. Е. Гольдберг в 1909 г. предложил простой метод приготовления таких клиньев. С этих пор выработано много разнообразных, очень интересных и удобных методов клиновой сенситометрии. В особенности прост и поучителен метод Р. Лютера получения характеристической кривой светочувствительной эмульсии. Состоит он в следующем: работают с нейтральным серым клином квадратной формы и известной градации, плотность которого, например, возрастает от 0 до 6 на протяжении 125 *мм*, что соответствует константе клина около 0,05 на 1 *см* и шкале интенсивности от 1 до 1 *мм*. Исследуемая пластинка освещается под таким клином стандартным источником света и контрастно проявляется. Затем полученный негатив кладется под такой же самый клин, но таким образом, что линии, соединяющие точки одинаковой плотности, проходят под прямым углом к их первоначальному положению. Если такой негатив, сложенный с клином, рас-

смaтривать в проходящем свете, то характеристическая кривая рисуется в виде нерезкой границы, представляющей кривую равных интенсивностей, или геометрическое место точек одинаковой градации.




**60.** Кривая скрещенных клиньев.

Плотность $D_n$ негатива есть только функция абсциссы, т. е. $D_n = \Phi(x)$, где $x$ означает абсциссу. В нейтральном клине плотность его $D_k$ пропорциональна толщине или ординате, т. е. $D_k = ay$, где $a$ означает константу клина (клин положен крест-на-крест на негатив). Когда негатив и клин сложены вместе, то результирующая плотность $D_s = D_n + D_k = \Phi(x) + ay$. Положение, т. е. геометрическое место точек $(x, y)$, имеющих одинаковую плотность $C$, определяется следующим уравнением:

$$\Phi(x) + ay = C;$$

откуда получается, что

$$y = \frac{C}{a} - \frac{1}{a}\Phi(x) = \frac{C}{a} - \frac{1}{a}D_n.$$

Этому уравнению соответствует кривая, ординаты которой пропорциональны плотности негатива плюс некоторая константа. Как фактор пропорциональности, так и константа зависят от константы клина или, вернее, от численного значения $C$.

Такие кривые одинакового контраста удобнее всего рассматривать, когда они отпечатаны в виде копии. В качестве позитивного материала наиболее подходит жесткая, контрастно работающая фотомеханическая эмульсия. Г. Хигсон показал, что повысить резкость пограничной линии можно вместо многократной репродукции путем однократного копирования на контрастно работающей газопечатной бумаге и затем местного ослабления (в ослабителе с красной кровяной солью). Хигсон также указал, что в специальных случаях лучше для экспозиции и для фотометрирования пользоваться клиньями с разными константами в зависимости от того, желательно ли получить всю характеристическую кривую или только часть ее.

В полученные описанным путем снимки можно впечатать сетку и получить таким образом шкалу (рис. 60); при этом какая-нибудь обозначенная целым числом точка горизонтально лежащей шкалы $\log_{10}E$ совмещается с точкой, для которой экспозиция пластинки известна. Освещения $(I \cdot t)$ изображаются длиной отрезков: 1, 10, 100 *см* и т. д., так что $\log_{10}E = 0,1,2$ и т. д. Ориентируясь указанным образом в экспозиции, получаем нормальную

шкалу $\log_{10}E$. Плотности промеряются в вертикальном направлении, вверх от линии с плотностью 0. Последнюю находят следующим образом: в месте наименьшей плотности на желатине проводится царапина в виде линии, параллельной краю пластинки. Фотографические измерения плотности будут совпадать с визуальными (фотометрическими) измерениями только в том случае, когда отсутствует какая бы то ни было спектральная избирательность.

Клиновая сенситометрия имеет разнообразное применение, причем используются различные свойства скрещенных клиньев и иногда вместо фотографических применяются фотометрические способы промера. Такие методы описаны А. Ваткинсом, предложившим также прибор для измерения $\gamma$ и определения «средней чувствительности», т. е. положения, средней точки прямолинейного участка кривой Хертера и Дриффильда. Ф. Ф. Ренвик тоже сконструировал прибор, который может быть использован для изучения градации и измерения $\gamma$. Этот прибор основан на следующем. Если два скрещенные клина с разными константами вращать относительно друг друга, то можно дойти до положения, при котором наклон более плоского клина компенсирует наклон более крутого клина. Косинус угла поворота, отсчитываемого от нулевого положения, т. е. от скрещения под прямым углом до положения, в котором наступает компенсация, равен отношению наклонов плоского и крутого клиньев. Если константа или наклон более крутого клина известны, то $\gamma$ можно определить в результате одного измерения.

### Актинометрия

Актинометрия дополняет сенсинометрию тем, что специально занимается измерением фотографически активного света.

Теоретически задачей актинометрии является измерение всего потока световой энергии и его спектрального распределения в естественных и искусственных источниках света; практически же задача актинометрии ограничена измерением фотографически активного света и установлением чувствительности различных материалов. А к т и н о г р а ф и я преследует следующую цель: актинометрические данные о дневном свете суммируются в особые таблицы или изображаются в виде кривых; они собираются для каждого часа и для каждого дня на протяжении целого года (при измерениях учитывается и географическое положение). Эти данные, расположенные по величинам яркости (солнечно, облачно и другие факторы погоды), по типам об'ектов (ланшафт, морской вид, внутри помещения и т. д.), сводятся в таблицы, наносятся на счетные линейки и практически используются при с'емке, причем учитывается также относительное отверстие об'ектива и чувствительность пластинок. Пользуясь этими данными в каждом отдельном случае, можно непосредственно определить в секундах нужное время экспозиции, согласно следующей формуле:

$$\text{Время экспозиции} = \frac{\text{номер диафрагмы} \times \text{фактор типа об'екта}}{\text{яркость} \times \text{чувствительность пластинки}} \qquad 1$$

С помощью актинометров («Beleichtungsphotometr») Ваткинса, Ванна и др.) проделывается подлинное испытание освещения: отыскивается время (в секундах), необходимое для того, чтобы зачернить кусок чувствительной «нормальной бумаги» (бромистое серебро + азотистокислый калий) до получения определенного «нормального тона» (что устанавливается путем сравнения). При этой операции ориентируются на лучи, которыми освещен об'ект. Такими актинометрами пользуются совместно с таблицами или вычислительными линейками, на которых нанесены величины диафрагм (относительные отверстия) и величины чувствительности пластинок. Время экспозиции в секундах в каждом специальном случае вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Время экспозиции} = \frac{\text{номер диафрагмы} \times \text{число секунд по актинометру}}{\text{чувствительность пластинок}} \qquad 2$$

Помещаемая ниже таблица чувствительности пластинок в главной своей части составлена А. Ваткинсом. Данные о чувствительности по Чепман-Джонсу и Шейнеру означают величины «порога» почернения от светового воздействия, обнаруживающиеся на проявленных негативах, полученных с помощью соответствующих сенситометров. Величины чувствительности по Хертеру и

**Чувствительность пластинок по различным системам** [1]

| Сорт пластинок | Х и Д | Ваткинс | Виии (иомера диафр.) | Шейнер | Чепмаи-Джоис |
|---|---|---|---|---|---|
| Очень мало чувствит. | 7,5 | 11 | F 22 | 2 | 15,3 |
| | 11 | 16 | F 28 | 3,5 | 16,0 |
| | 16 | 22 | F 32 | 5 | — |
| Мало чувствит. | 22 | 32 | F 39 | 6,5 | 18,0 |
| | 32 | 45 | F 45 | 8 | — |
| | 45 | 65 | F 56 | 9,5 | — |
| Средией чувствит. | 65 | 90 | F 64 | 11 | 20 |
| | 130 | 180 | F 90 | 14 | 24 |
| | 180 | 250 | F111 | 15,5 | 25 |
| Чувствит. (рапид) | 250 | 350 | F128 | 17 | — |
| | 350 | 500 | F156 | 18,5 | — |
| Очень чувствит. (ультра-рапид) | 500 | 700 | — | — | — |
| | 700 | 1000 | — | — | — |

[1] Надо заметить, что системы Ваткинса, Виниа, Чепмаи-Джонса в иастоящее время почти совершенно ие употребляются. В Аиглии и Америке пользуются системой Хертера и Дриффильда. В Германии и Австрии чувствительиость пластииок обозначается в градусах Шейнера и — в последиее время в градусах клииа Эдер-Гехта.
В СССР для обозначеиия чувствительиости принята система Хертера и Дриффильда, а для бумаг относительная чувствительиость по Эдеру — обратиая величина количества света (в люксах), дающего порог чувствительиости. Примеч. переводчика.

Дриффильду получены путем деления 34 на величину инерции характеристической кривой, причем инерция измеряется в метросекундо-свечах. Чувствительность по А. Ваткинсу в $1\frac{1}{2}$ раза больше, чем по Хертеру и Дриффильду. По Ваткинсу чувствительностью, равной единице (нормальная величина), обладает пластинка, дающая летом, в солнечный день, при двухсекундной экспозиции и относительном отверстии об'ектива 1 : 8 правильно экспонированный ландшафтный снимок. Ванн выражал чувствительность пластинки величинами диафрагм (номером диафрагм) и основал свою систему на принципе, аналогичном системе Ваткинса.

Следует отметить, что при очень малых интенсивностях света время экспозиции нельзя вычислить прямо по формуле 2. Об этом обстоятельстве не следует забывать; в связи с ним напоминаем сказанное выше об отклонениях от закона Бунзена и Роско.

#### Передача величин яркости (детали яркости)

Знание изложенных свойств нейтральносерых клиньев и метода клиновой сенситометрии позволяет нам теперь перейти к важнейшей области применения сенситометрии, к проблеме передачи ступеней яркости. Под ступенями яркости мы разумеем переходы от света к тени в об'екте или, выражаясь иными словами, градацию яркостей какого-либо предмета вне зависимости от его окраски. Эта проблема — основная проблема практической фотографии, но здесь нам придется коснуться ее только в общих чертах. Хертер и Дриффильд первые занялись этой темой, установив точное определение правильно выполненного негатива и разделив «характеристическую кривую» на три участка: 1) область недодержки, 2) область нормальной экспозиции и 3) область передержки. Со времени Хертера и Дриффильда мало кто занимался этими вопросами; только в последнее время этой проблемой очень интенсивно и с большим успехом занялись Е. Гольдберг, Ф. Ф. Ренвик, Л. А. Джонс и некоторые другие исследователи.

#### Распределение яркости в об'екте

С физической точки зрения можно принять, что яркость какой-либо части об'екта идентична с исходящей от нее интенсивностью света или фотометрической яркостью, независимо от того, вызвана ли она собственным или отраженным излучением. С физиологической же точки зрения можно говорить о кажущейся яркости, которая может быть определена при посредстве физической яркости, воспринимаемой человеческим глазом. Физическое распределение яркостей в каком-либо предмете, т. е. контраст на его поверхности, можно определить фотометрически. Если произвести такие измерения, то оказывается, что в обычном ландшафте имеются ступени яркости, относящиеся как 1 к 10 («бледные» ландшафты); ступени от 1 до 30 или от 1 до 40 соответ-

ствуют нормальной области контраста, а от 1 до 60 и выше называются областью большого контраста, а от 1 до 250 предельно большим контрастом. При с'емке внутри помещений Джонс нашел следующие величины: для портрета типична область контраста от 1 до 60, а у технических об'ектов (машин, аппаратуры) область контраста может распространяться от 1 до 100.

### Полезная широта плотностей позитивных материалов

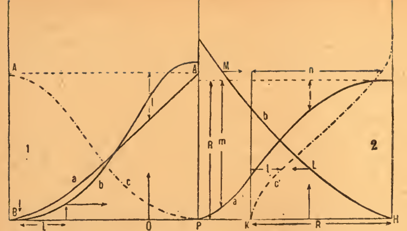
Когда распределение контрастов на поверхности об'екта должно быть передано фотографическим путем, то естественно встает вопрос, в каких пределах позитив (копия) в состоянии передать эти различия яркостей. Может ли копия передать ступени яркости, соответствующие яркостям об'екта? Ренвик нашел, что матовые газопечатные бумаги и бумаги с проявлением обладают шкалой яркостей от 1 до 20, а глянцевые бумаги того же сорта — от 1 до 50 (между максимальным почернением и чистой бумагой). Джонс констатировал, что сорта бумаг, наиболее употребительные в любительских кругах, обладают шкалой от 1 до 5 как минимум и от 1 до 20 как максимум. Бумаги, которыми пользуются фотографы-профессионалы в портретной фотографии, имеют шкалу от 1 до 40 или от 1 до 60. Последнюю величину надо считать в среднем максимальной. Ренвик нашел у глянцевых дневных бумаг ступени яркости от 1 до 200. Сопоставляя приведенные данные, видим, что обычные позитивные материалы в среднем обладают способностью, достаточной для воспроизведения ступеней яркости, имеющихся в обычных об'ектах. Следующий вопрос — насколько мы в состоянии правильно фотографически воспроизвести градацию яркостей оригинала.

### Пределы правильной передачи яркостей

Пределы, в которых возможна правильная передача яркостей, определяются границами прямолинейного участка характеристической кривой бумаги для копирования или диапозитива. Точная передача величины яркости негатива, а следовательно и об'екта, зависит от этого прямолинейного участка. Так как область отражательной способности бумаги для копирования в указанных пределах значительно меньше области яркостей, обычно содержащихся в об'екте, то естественно приходится жертвовать правильностью передачи яркостей на обоих концах шкалы яркостей об'екта. В дальнейшем мы перейдем к подробному рассмотрению возможности передачи и точной репродукции ограниченной области яркостей.

### Установление правильной передачи яркостей

Если мы ограничимся исследованием условий точной передачи яркостей только с физической и фотометрической точек зрения, то нам следует применить метод, имеющий целью выразить соотношения, которые должны быть между негативом и позитивом




**61.** Правильная фотографическая передача яркости об'екта.

в том случае, когда все ступени яркости оригинала передаются при одновременно точной репродукции. Портер и Сладе, Ренвик, Джонс разработали графические методы для установления этих соотношений.

Мы изложим сейчас метод Ренвика ввиду его точности и связи со сказанным нами по поводу клиновых сенситометров. Об'ектом своих рассуждений Ренвик берет нейтрально серый клин, наклон. широта и плотности которого предполагаются известными. Какой-нибудь негативный материал подвергается ряду экспозиций под этим клином; затем с полученного негатива делается копия на позитивном материале. Так как мы не сможем лучше самого автора изложить его способ, поэтому цитируем по его статье: «Каждой точке на «оси экспозиций» характеристической кривой отвечает известная величина $\log_{10}E$ и известное почернение; промежуток между любыми двумя величинами почернений выражает разность почернений, или определенный контраст, и соответствует равной по величине разности $\log_{10} E$, но с обратным знаком.

Так как

$$D_1 = \log_{10}\frac{I_0}{I_1} \quad \text{и} \quad D_2 = \log_{10}\frac{I_0}{I_2},$$

то

$$\begin{aligned} D_1 - D_2 &= \log_{10} I_0 - \log_{10} I_1 - \log_{10} I_0 + \log_{10} I_2 \\ &= \log_{10} I_2 - \log_{10} I_1 \\ &= \log_{10} E_2 - \log_{10} E_1 , \end{aligned}$$

где $I_0$ — количество падающего, а $I_1$ и $I_2$ — прошедшего света; $D_1$ $D_2$ — соответствующие величины почернения в каких-либо двух точках».

*Пример 1.* На рис. 61 (1) *a* и *d* представляют характеристические кривые взятого негативного и позитивного материала. Нам желательно по этим двум кривым определить, какова будет кривая градации позитивного изображения, полученного в тех же усло-

внях (проявленне и т. д.), что н сенситограммы, нз которых выведены характернстические крнвые. Допустим, что мы умышленно хотнм сохраннть чнстые белые места на тех участках познтива, которым в негатнве соответствуют места наиболее интенсивного почернения. Для того чтобы это стало возможным, нужно при копированнн освещать с таким расчетом, чтобы нспользовалась ннжняя часть характернстнческой крнвой познтнвного матернала (ннже B), если мы передаем величнну яркости, соответствующую точке P орнгннала.

Все точкн искомой намн кривой c (изображенной на рис. 61 (1) штрнховым пунктнром) можно легко определить следующим образом. Рассмотрим точку Q нашего клина (передаваемого об'екта). Отрезок $l$, лежащий над этой точкой между прямой $AA$ н характеристической кривой негатнва, изображает такнм образом упомянутую разность почерненнй нли разность $\log_{10}E$, которой может располагать наша копня. Мы откладываем длину этого отрезка $l$ вдоль осн $E$, прнчем за начало отрезка берем точку $B$ и прочнтываем на характернстнческой крнвой ($b$) познтнвного материала велнчнну почернення, соответствующую конечной точке отрезка 1; найденную такнм путем велнчину откладываем как орднату для точкн Q: такнм же путем отыскнваем все прочне точкн нанесенной штрнховым пунктнром кривой c.

*Пример 2*. На рнс. 61 (2) изображены характернстическне крнвые негатнвного матернала ($a'$) н нужной нам кривой градации ($b'$) готового нзображения.

Вопрос заключается в том, какова должна быть характеристнческая кривая позитнвного материала для получення искомого результата. Полная широта плотностей негатнва представлена орднатой $R$; поэтому интересующая нас полная шнрота $\log_{10} E$ определяется отрезком такой же длнны на оси $E$. Для большей ясности мы изображаем его в днаграмме справа в виде отрезка $HK$.

Таким образом в изображенни (в копии) для передачи наименьшей экспозицни не требуется даже мнннмального почернения, в силу чего характернстнческая кривая $c'$ в точке $K$ нмеет плотность, равную нулю. Все прочне точки крнвой легко найти, как это показано на нашем рис. 61 (2) для точек $M'$ и $L'$: так как отрезки $l$ и $m$ представляют разности плотностей (а следовательно и разности $\log_{10} E$) негатнва, дающих при копированни плотностн $L'$ н $M'$, изображення, то на характернстической крнвой познтнвного матернала должны нметься точки, соответствующне $L'$ и $M'$, лежащне на шкале $\log_{10}E$ и отстоящне от $K$ на длину отрезков $l$ н $m$. Аналогнчным рассужденнем легко найти характеристическую кривую негатива, если дана характеристическая кривая познтнвного материала и крнвая градации готового изображення.

Простое условие, которое должно быть выполнено для достижения правнльной передачи яркостей, выводнтся на рис. 61 следующим образом. Наклон (угол направления) отдельных крнвых в какой-лнбо точке обозначим следующнм образом:

$G_n$ есть наклон характернстической крнвой негатнва,
$G_x$ есть наклон характернстнческой кривой позитива,
$G_r$ есть наклон крнвой градацнн изображення.

Тогда, как общее правило, можно написать, что $G_r = G_n \cdot G_p$ Для правильной передачи $G_r$ должно быть равно 1, т. е. в этом случае условие гласит, что $G_n \cdot G_p = 1$. В области прямолинейного участка $G = \gamma$, поэтому наше условие можно выразить иначе: $\gamma_n \cdot \gamma^d = 1$. Последнее уравнение не имеет большого значения, так как прямолинейная часть кривой позитивных материалов обычно неясно выражена.
Подробное изложение всего этого материала можно найти в цитируемой ниже работе Л. А. Джонса.

### Литература


J. M. Eder, Ausführliches Hdb. d. Phot. I, 3. Teil, 3 Aufl. Halle a. S, W. Knapp 1912.
The Photographic Researches of Hurter and Driffield, herausgegeben von W. B. Ferguson, London, Royal Photographic Society, 1920.
F. F. Renwick, Phot., Journ., 40, 1916, S. 222.
A. W. Porter und R. E. Slade, Phil. Mag. 38, 1919, S. 187.
L. A. Jones, Journ. of. Franklin Inst., 187, 1920, S. 39.
G. J. Higson, Phot. Journ. 45, 1921, S. 93.
F. E. Ross, Journ. of. the Opt. Soc. of. America, 4, 1920, S. 255.
E. Goldberg, Der Aufbau des photographischen Bildes, 2. Aufl, Halle a. S. W. Knapp.


## Передача деталей об'екта и структура фотографического изображения

Здесь мы переходим к вопросам, имеющим громадное значение в научном применении фотографии. Точная передача очень мелких деталей крайне существенна в спектральной фотографии, микрофотографии и астрофотографии. Когда нужно воспроизвести дублеты в спектре, структуру клеток, двойные звезды или бледные звездные туманности, необходимо знать, какие вообще существуют условия и соотношения передачи тончайших деталей. Если допустить, что взятая оптическая система в состоянии удовлетворить нашим требованиям, то остается решить вопрос, в каких пределах фотографический с'емочный материал и различные фотографические процессы влияют и ограничивают возможности решения этой проблемы. Затем, спрашивается, насколько точно могут быть промерены фотографические изображения линейных об'ектов и углов.

### Разрешающая способность и резкость

Разрешающую способность фотографической пластинки можно определить, указав расстояние двух близко друг к другу расположенных изображений, например линий, которые еще воспринимаются как отдельные линии. В качестве меры разрешающей способности обычно пользуются обратной величиной расстояния между этими линиями. Если две параллельные линии одинаковой ширины находятся друг от друга на расстоянии $d$, равном ширине линии, то разрешающую способность $R$ можно численно

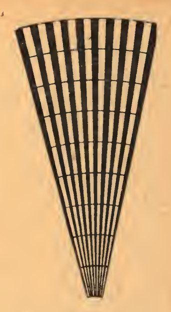
выразить количеством линий, укладывающихся в миллиметре; таким образом

$$R = \frac{1000}{2d},$$

когда $d$ измерено в микронах (μ).

Уедсворт принял, что две линии можно еще раздельно различить, если расстояние между их срединами равно четверти поперечника проявленного серебряного зерна негатива, причем он считал, что величина зерна серебра колеблется от 0,005 до 0,025 *мм*.

Миз измерял разрешающую способность пластинки, фотографируя в сильно уменьшенном виде веерообразную черную сетку на белом фоне (рис. 62); затем он определял, насколько оказалось возможным разрешить отдельные линии изображения, т. е. раздельно их передать. Одновременно определялось, какое влияние имеет иррадиация, т. е. распространение света в стороны в примененной пластинке. Исследование состояло в том, что при сильном уменьшении (около 1 : 22) фотографировалась закрытая нейтрально-серым клином щель, вдоль которой менялась интенсивность освещения (1 : 60). При этом получалось клиновидное изображение, ширина которого росла с интенсивностью света, и оказалось, что разрешающая способность пластинки зависит от иррадиации. Последняя не прямо пропорциональна величине зерна галоидного серебра и в значительной мере зависит от промежуточных отражений и дифракционных явлений.



62. Тестооб'ект по Мизу, служащий для определения разрешающей способности эмульсии.

Расширение изображения, т. е. увеличение его в стороны в силу иррадиации, исследовано многими астрономами и учитывается в звездной фотографии.

Шейнер дал уравнение, устанавливающее зависимость между диаметром изображения звезды («точки») и экспозицией, а именно:

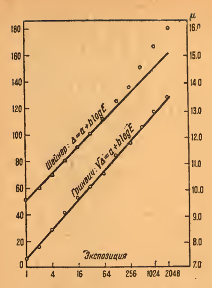
$$\Delta = a + b \cdot \log_{10} E \cdot$$

Гринвические астрономы вывели уравнение следующего вида:

$$\Delta^{\frac{1}{2}} = a + b \ \log_{10},$$

в котором $\triangle$ есть поперечник изображения, $E$ — экспозиция, $a$ и $b$ — константы.

Оказалось, что первое уравнение годится для области экспозиций от 1 до 500, а второе охватывает гораздо бо́льшую область — от 1 до 15 000 (рис. 63). Росс доказал, что уравнение Шейнера согласуется с тем обстоятельством, что интенсивность света или,



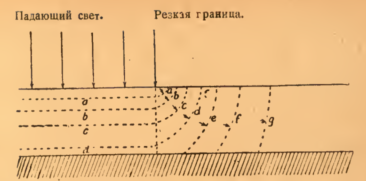

63. Расширение точки изображения вследствие иррадиации. По оси абсцисс отложена экспозиция.

вернее, яркость на краю изображения может быть передана следующей зависимостью:

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{1}{\kappa^x}},$$

где x означает расстояние участка изображения, попавшего в глаз, от края изображения а $\kappa$ — константу. Предыдущее уравнение идентично с законом Ламберта-Бэра, при этом $\frac{1}{\kappa}$ соответствует показателю поглощения. Конечно такое уравнение может быть справедливо только в известных ограниченных пределах. Это следует не только из того обстоятельства, что самое уравнение Шейнера справедливо в пределах определенной области, но и вытекает из ряда важных исследований Ренвика, Ченнона и Блоха над распространением света в рассеивающих и мутных средах. Во всяком случае приведенное уравнение полезно как первое приближение и интересно тем, что из него можно вывести кривую, которая передает распространение почернения за край изображения, а по форме совпадает с характеристической кривой, которая, как известно, выражает зависимость между экспозицией и почернением, а это означает, что характеристическая кривая эмульсии соответствует «кривой резкости» (Schärfenkurve). Разница заключается только в том, что у последней кривой абсциссы значительно уменьшены умножением на постоянный фактор. В силу этого обстоятельства из характеристической кривой можно крайне просто вывести «резкость» (см. работу Росса, в приводимой ниже литературе).

Гольдберг исследовал, как расширяется изображение в стороны. Это определяется следующим образом. Маленькую круглую диафрагму приводят в контакт с эмульсией и подвергают ряду возрастающих экспозиций. Диаметры изображения наносятся в качестве ординат по отношению к отдельным экспозициям, служащим абсциссами; в результате получается кривая, которую Гольдберг называет *кривой рассеяния* (Trübungskurve). Наклон $\kappa$ этой кривой в какой-нибудь ее точке он называет *фактором рассеяния*. Этот наклон меняется с экспозицией, но не так, как в кривой, найденной Шейнером (и Мизом). Гольдберг не мог установить никакой зависимости между названным фактором и зерном пластинки, так как в пластинке без зерна Липпманна $\kappa = 0$, а в высокочувствительных крупнозернистых пластинках имеет место сильное расширение изображения (но мелкозернистые бромосеребряные бумаги и пластинки дают




**64.** Падение плотности на краю изображения.

тоже сильное расширение). Гольдберг отождествляет свой фактор рассеяния с обратной величиной светового градиента, измеряемого кнаружи от края изображения.

Как известно, мерой контраста при проявлении в пределах области нормальных экспозиций служит наклон $\frac{dD}{d\,\log_{10} I}$ характеристической кривой. Падение плотности на краю изображения, где начинается нерезкость (рассеяние), равно $\frac{dD}{dx}$, т. е. наклону кривой, у которой ординатами являются величины плотности, а абсциссами — отдельные расстояния, измеренные в сторону от края изображения (рис. 64).

Указанную выше величину Гольдберг называет фактором резкости, обозначая ее через $S$.

Так как

$$S=\frac{dD}{dx},$$

то

$$S=\frac{dD}{dx}=\frac{dD}{d\log_{10}E}\cdot\frac{d\log_{10}E}{dx}=\frac{\gamma}{K};$$

иными словами эта зависимость выражается следующим образом: «резкость» равна фактору проявления, деленному на фактор рассеяния.

На рис. 64 схематически изображено распределение света на краю изображения; отдельные кривые, изображенные пунктиром, представляют зоны равного почернения (яркости), полученные например таким образом: резкая грань (скажем, лезвие бритвенного ножа) приставлена к пластинке и освещена. Падение плотности по краю таких изображений лезвия ножа измерено П. Г. Нуттингом, О. Тугманом и Ф. Е. Россом. Об'ем настоящей статьи не позволяет более подробно коснуться технической стороны подобных измерений, представляющих известные трудности вследствие того, что расположенные очень близко друг к другу зоны, на которые распространяется расширенное изображение, должны быть исследованы микрофотометрически.

Если менять время проявления полученных таким путем изображений, то оказывается, что вычисленные значения величины $S = \frac{\gamma}{K}$ совпадают с значениями, полученными путем измерения, только в том случае, когда $\gamma = 1$, т. е. пока находятся вблизи нормального фактора проявления. Нижепомещаемая таблица поясняет наблюдаемые при этом соотношения.

| Время проявления в мин. | $\gamma$ | S измеренное | S вычисленное |
|---|---|---|---|
| 0,75 | 0,71 | 0,123 | 0,085 |
| 1,50 | 1,16 | 0,114 | 0,139 |
| 3,00 | 1,48 | 0,121 | 0,178 |

Формула $S = \frac{\gamma}{K}$ дает, с одной стороны, характеристику данной пластинке или, вернее, эмульсии, а с другой — возможность судить о том, какова должна быть эмульсия, чтобы на ней получалось резкое изображение: 1) эмульсия должна обладать большим фактором проявления и малым фактором рассеяния; 2) эмульсия должна иметь характеристическую кривую с длинным прямолинейным участком и коротким нижним участком («хвостом») — это необходимо для того, чтобы максимальный наклон кривой достигался уже при сравнительно малой величине почернения. Одновременное достижение названных условий — далеко не легкое дело, так как характеристические кривые эмульсий, дающих наивысшие значения $\gamma$, обычно имеют короткий прямолинейный участок.

### Резкость в зависимости от длины волны света

Как рассеяние, так и фактор проявления зависят от длины волны примененного при экспозиции света.

В случае, исследованном Россом, оказалось, что с изменением длины волны действующего света происходит изменение рассеяния и гаммы, что и изображено на рис. 65. В результате комбинации этих двух величин получается кривая, которая выражает теоретическое соотношение между длиной волны и резкостью. На рис. 66 эта кривая изображена пунктиром. На том же рисунке помещена «кривая длин волн и резкости», полученная на основании опытов и измерений. Соответствие обеих кривых относительно хорошее. Наблюдаемое отклонение особенно ясно заметно в красной спектральной области.

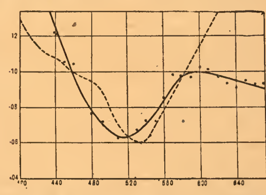
### Действительная (эфективная) разрешающая способность

Теперь займемся эфективной разрешающей способностью эмульсии. В предыдущих отделах мы показали, что величина разрешающей способности определяется повидимому не только

величиной проявленного зерна, но также и резкостью, которая в свою очередь зависит от оптических и физикохимических свойств эмульсии. В каком отношении между собой находятся величина проявленного зерна и резкость, можно установить сравнивая разрешающую способность нормальной эмульсии при физическом и химическом ее проявлении. Повидимому в обоих случаях величина фактора рассеяния одинакова, а контраст очень различен. Росс нашел, что в случае пластинок Seed — 23 $\gamma$ была равна 0,5 при физическом проявлении и 2,5 — при химическом.

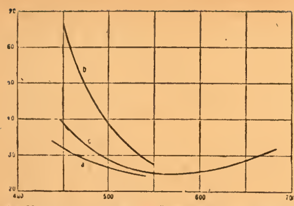
Так как $S = \frac{\gamma}{K}$, то можно ожидать, что при химическом проявлении резкость увеличивается, что можно было бы подтвердить и экспериментально. Однако оказалось, что величина разрешающей способности при физическом проявлении на 20% выше, чем при химическом, что следует отнести за счет того, что при физическом проявлении получается гораздо более мелкое зерно.

**65.** Изменение фактора рассеяния и $\gamma$ в зависимости от длины волны действующего света; справа по оси ординат нанесены величины помутнения, а слева — величины гаммы. По оси абсцисс нанесены длины волн.




**66.** Изменение резкости в зависимости от длины волны. По оси абсцисс отложены длины волн, а по оси ординат „факторы резкости“.

Пользуясь предложенным Мизом веерообразным тестоб'ектом (см. рис. 62), К. Хьюз исследовал влияние различных проявителей и способов проявления на разрешающую способность. Он нашел следующее: при возрастании времени проявления разрешающая способность более или менее быстро доходит до некоторого максимума; при дальнейшем продолжении проявления разрешающая способность снова падает. Различные проявители дают разную разрешающую способность — различия получались довольно заметные. Наивысшую разрешающую способность дал пирогаллол с содой (77), а наименьшую — эдинол (47), при этом во всех случаях брался один и тот же сорт пластинок. Если же



**67.** Изменение разрешающей способности в зависимости от длины волны. По оси абсцисс нанесены длины волн, а по оси ординат — величины разрешающей способности. Кривая *a* относится к ортохроматической пластинке, *b* — к диапозитивной пластинке Seed и *c* — к панхроматической пластинке Wratten Wainwright.

брался один и тот же проявитель и различные сорта пластинок, то получались величины, указанные в нижеследующей таблице:

| Сорт пластинок | Чувствительность в градусах H & D | Разрешающая способность |
|---|---|---|
| Пластинки | 0,01 | 125 |
| Пластинки Wratten и Wainwright с высокой разрешающей способностью | 3,00 | 81 |
| Позитивная кинопленка Kodak | 10,00 | 42 |
| Seed – 23 | 150,00 | 35 |
| Seed graflex | 450,00 | 25 |

В отношении влияния длины волны света, применяемого при экспозиции, было показано, что оно различно для различных эмульсий. В общем же разрешающая способность в синей и фиолетовой спектральных областях велика, в зеленой падает до минимума, а в красной снова возрастает. Эти результаты в общем хорошо согласуются с теми обстоятельствами, которые мы установили выше при исследовании изменения резкости S с длиной волны света $\lambda$ (рис. 67).

В фундаментальном труде, цитируемом в конце этого отдела, Гольдберг разбирает вопрос о допустимости пользования оптически уменьшенными изображениями систем линий в качестве тестооб'ектов и обосновывает свою критику тем, что уже исследование оптической разрещающей способности фотографического об'ектива сопряжено с трудностями и сообщает проблеме

известную неопределенность. Гольдберг разработал простой и очень практический метод для определения, как он выражается, «предела разрешения». Под пределом разрешения он подразумевает наименьший поперечник кружка или наименьшую ширину линии, которые еще можно разборчиво передать на фотографической эмульсии. С задней стороны хорошо посеребренного зеркала удаляется лак. На серебряном слое с помощью тонкого наждака наносится большое число тонких царапин. Фотографический слой приводится в контакт с обработанным таким образом зеркалом и подвергается освещению, достаточному для получения вполне различимого отпечатка. Результирующие отпечатки дают возможность удобно вычислять границу разрешающей способности. Различным эмульсиям свойственна различная способность передачи тончайших линий.

### Практические выводы

Основываясь на своих экспериментах, Гольдберг и Росс сделали ряд выводов в отношении фотографически достижимой резкости и разрешения. При пользовании нормальными или недостаточно коррегированными об'ективами для достижения наивысшей резкости надо применять пластинки, дающие предельно большой контраст ($\gamma$); пластинку нужно проявлять до конца. При пользовании не вполне хорошими оптическими системами недостаток разрешающей способности, зависящий от свойств эмульсии, имеет второстепенное значение по сравнению с недостаточной разрешающей силой об'ектива. Если же применять оптические системы с большой разрешающей силой и для образования изображения пользоваться преимущественно приосевыми лучами, то возможны два предельных случая:

1. Когда дело сводится к воспроизведению тонких линий или структур с малым контрастом, фактором рассеяния можно пренебречь, так как при коротких освещениях распространение света в сторону не играет никакой роли. В этом случае огромное значение имеет разрешающая способность.
2. Возможен и другой случай, когда нужно воспроизвести тонкие линии или структуры, имеющие большой контраст, т. е. об'екты, в которых содержатся большие различия яркости, — такие случаи встречаются в звездной спектроскопии, где могут быть рядом расположены линии или точки очень различной интенсивности. Если в этом случае дать слишком короткую экспозицию, то линии и точки малой интенсивности не будут переданы, если же дать длинную экспозицию, то расширятся линии с большой яркостью. Так как в этом случае приобретает важное значение фактор рассеяния, то для подобных целей необходимо, не обращая внимания на разрешающую способность, пользоваться пластинками с малым фактором рассеяния.

В отношении последнего приведенного Гольдбергом заключения Росс указал, что увеличения резкости (т. е. уменьшения фактора рассеяния) можно достичь, пользуясь фиолетовым светом и пластинками с желтым красителем в слое, так как при этих усло-

виях уменьшается боковое распространение света. Это обстоятельство практически не применимо в астрономии. В условиях лабораторного опыта привходящие извне влияния, усиливающие рассеяние, могут быть сделаны как угодно малыми, а в астрономической фотографии они не поддаются воздействию и потому могут превысить влияния, зависящие от эмульсии. Поэтому здесь следует предпочесть пользование пластинками с предельно большой степенью контраста ($\gamma$).

### Зерно светочувствительного слоя

Под «зерном» проявленного изображения обычно разумеется величина частичек серебра. Для измерения последней требуется микроскоп с очень сильным увеличением. При рассматривании пластинок или пленок после проявления в микроскоп с малым увеличением или при увеличении путем проекции обнаруживается «зернистость», которая в известных случаях может сильно мешать. Эта зернистость происходит от того, что частички серебра величины «первого» порядка соединяются в агрегаты «второго» порядка. Когда же зернистость доходит до образования комочков еще более высокого порядка, то зернистость можно различить невооруженным глазом.

Вышепримененные термины (первого, второго и более высокого порядка) имеют известную аналогию с математическим способом выражения, но употреблены в смысле, обратном принятому в математике.

Экспериментально можно показать, что каждой степени увеличения соответствует определенная степень зернистости при условии, что примененная для проектирования оптическая система обладает достаточной разрешающей силой. Л. А. Джонс и Н. Дейш показали, что зернистость можно выразить численно, если принять, что зернистость $k$ прямо пропорциональна расстоянию, с которого она визуально становится уже неразличимой; это расстояние сравнивается с расстоянием, при котором некоторый структурный рисунок заведомо известной степени тонкости (например сетка с очень мелкими промежутками между линиями — автотипный растр) начинает исчезать (расплываться). Если принять, что линейный растр, содержащий 75 линий в сантиметре, выглядит при вышеописанных условиях так же, как и зернистость какого-нибудь проявленного изображения, то последнюю можно численно выразить величиной 200. Обусловленная зернистостью неоднородность изображения отзывается как на разрешающей способности светочувствительного слоя, так и на способности к передаче деталей.

### Вторичные искажения структуры изображений

В тех случаях, когда фотографическая пластинка используется для точных измерительных целей, т. е. когда на ней например промеряются малые участки, как это имеет место в спектроскопии и астрономии необходимо хорошо ориентироваться в том, какая при этом может быть достигнута степень точности. В вышеупомянутых и аналогичных случаях даже незначительные,

вторичные, обстоятельства при экспозиции и проявлении уже играют существенную роль.

Костинский в 1906 г. производил исследования точности фотографических измерений при определении относительного положения двойных звезд и сателлитов и нашел, что при этом наблюдается ясно выраженное взаимное «отталкивание» смежных изображений. При разной продолжительности экспозиции при фотографировании очень отдаленной двойной звезды получаются следующие результаты:

| Время экспозиции в мин. | Диаметр в *мм* | | Расстояние в *мм* | |
|---|---|---|---|---|
| | звезды | соседа | между внутренними краями | между наружными краями |
| 1 | 0,282 | 0,039 | 0,086 | 0,2467 |
| 16 | 0,482 | 0,080 | 0,014 | 0,2667 |

При продолжительной экспозиции имело место накладывание изображений друг на друга на протяжении 0,014 *мм*, а расстояние между наружными краями возросло по сравнению с более короткой экспозицией на 0,020 *мм*, т. е. почти на 8%. Аналогичные результаты измерения получил Лау, в то время как другие исследователи констатировали как «сближение», так и «отталкивание» смежных изображений. Если проанализировать эти результаты и проследить причины, которым они обязаны своим происхождением, то, по Ф. Е. Россу, можно указать следующие три причины, которые должны определить названные явления:

*Эфект рассеяния.* Он обусловливает то, что смежные изображения кружков в силу иррадиации принимают форму яйца, центры фигур при этом сближаются. Этот эфект на практике перекрывается либо эфектом проявления либо эфектом Костинского, но может достигать и больших величин в случаях, когда изображения соприкасаются.

*Эфект сморщивания, смещения желатины.* Изучением этого эфекта занимался особенно Росс. В случае применения в качестве проявителя пирометола или гидрохинона с едким натрием изображения сближаются друг с другом на расстоянии, величина которого зависит от величины почернения изображения, от температуры и состава проявителя. У изображений в форме кружка с диаметром около 5 *мм* это сжатие достигает максимума и может влиять на нормальное расплывание изображения (учитываемое в звездной фотометрии; см. начало этого отдела) таким образом, что диаметр изображения при увеличении экспозиции проходит через минимум. Гидрохинон с поташом, метолгидрохинон и хлоргидрохинон дают изображения, в которых описанный выше эфект как будто бы не обнаруживается, что вполне можно отнести за счет того, что «задубленное» изображение и окружающая его поверхность слоя сохнут неодинаковым образом. При измерении двойных звезд или эфекта Эйнштейна (ясное приближение изображения звезды к краю солнца на фотографиях сол-

нечного затмения) и наконец, при промерах спектрограмм данный эфект может играть роль.

*Эфект проявления*. Этот эфект сводится к тому, что при проявлении образуются местные накопления продуктов реакции и в различных участках диффузия проявителя идет различным образом. В так называемом эфекте Эбергарда сказывается зависимость почернения (плотности) от величины изображения, а в эфекте Костинского (см. выше) обнаруживается ясное отталкивание смежных изображений, увеличивающееся при возрастающей экспозиции. Последнее особенно важно в спектральной фотографии. Росс установил, что суммарный эфект проявления всегда зависит от того, в каком соотношении друг к другу находятся оба взаимно противоположно действующие факторы, и что в силу этого обстоятельства, как правило, можно рекомендовать сведение экспозиции к известному минимуму.

#### Литература


A. Wadsworth, Astrophys. Journ., 3, 1896, S. 188.
C. E. K. Mees, Proc. Roy. Soc. 88. (A), 1909, S. 10.
S. Kostinsky, Mitt. d. Nikolai-Hauptsternwarte zu Pulkowa, Bd. 1, Nr. 2, und Bd. 2, Nr. 14.
H. E. Lau, Astronom. Nachrichten, 192, 1912, S. 179.
E. Goldberg, Phot. Journ., 36, 1912, S. 300.
F. E. Ross, Astrophys, Journ. 52, 1920, S. 98 und 201, 53, S. 349
L. A. Jones und N. Deisch, Journ. Frankl. Inst. 1920, S. 657.
F. E. Ross, The physics of the Developed Photographic Image, Monographs on the Theory of Photography from the Research Laboratory of the Eastman Kodak Company, Bd. V. D. van Nostrand Company, New-Iork, 1924, vgl auch Phot. Korr, 62, 1926, S. 13.
G. Eberhard, Photographisch-photometriche Untersuchungen, Publikationen des astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam, Bd. 26, Heft I (Nr. 84), Potsdam. Yerlag des Observatoriums, 1926.


## Ортохроматическая и цветная фотография

При изложении передачи ступеней яркости оригинала мы умышленно не учитывали различия в цветности. Фотографическую передачу цвета можно рассматривать с двух точек зрения. С одной стороны, с точки зрения ортохроматической фотографии: в этом случае пред'является сравнительно скромное требование передачи различных цветов в виде черно-белых тонов, соответствующих визуальным яркостям этих цветов, причем внимание уделяется в большей или меньшей мере определенным эстетическим требованиям. Когда дело сводится только к репродукции цветов (длин волн), говорят об изохроматической фотографии; такая репродукция важна в некоторых случаях научного применения фотографии. Другая точка зрения более высокого порядка: это уже цветная фотография в собственном смысле этого слова, в которой требуется передача самих цветов. Вопросы эти будут подробно разработаны в X главе настоящей книги, поэтому здесь мы коснемся только их физических и химических основ.

### Ортохромазия и изохромазия

Термины «ортохроматический» и «изохроматический» применяются к таким пластинкам, которые чувствительны не только к сине-фиолетовой спектральной области, но кроме того очувствлены (сенсибилизированы) к желто-зеленой области. Однако, даже когда такие пластинки высоко чувствительны к последней названной области, то синий, фиолетовый и ультрафиолетовый цвета кроются непропорционально сильно, а красный вовсе не передается. Идеальная ортохромазия базируется на следующих трех основах:

а) Визуальная яркость цветов, которая может быть изображена кривой чувствительности глаза (применительно к нормальному глазу).

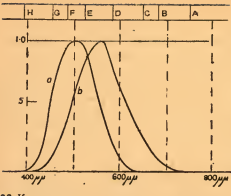
б) Кривая чувствительности эмульсии к цветам (длинам волн); эмульсия при этом должна быть панхроматична, т. е. должна быть чувствительна ко всему видимому спектру. Так как у разных источников света распределение энергии по спектру различно, то для определения выбирается источник света, ближе всего подходящий к солнечному свету.

в) Фильтрующее действие, т. е. кривая поглощения светофильтров, применяемых для регулирования распределения чувствительности. Первоначальное распределение чувствительности эмульсии вытекает из упомянутой в п. «б» кривой цветочувствительности; фильтрующее действие должно иметь целью достижение такого распределения чувствительности, которое соответствует упомянутой в п. «а» кривой чувствительности глаза; можно добиться также и какого-либо иного распределения чувствительности.

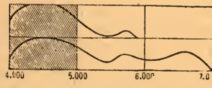
### Выравнивание и компенсация

Упомянутая выше кривая чувствительности нормального, недальтонического, глаза меняется с абсолютной интенсивностью света. Из рис. 68 можно усмотреть, что максимум этой кривой смещается в сторону более коротких волн, когда интенсивность света возрастает. Это явление известно под названием «явления Пуркинье» и сводится к тому, что приходится допускать существование двух процессов при зрении: мы различаем «дневное зрение», т. е. зрительное ощущение при больших интенсивностях света, воспринимаемое средней частью сетчатки, и «периферическое (сумеречное) зрение», т. е. зрение при малых интенсивностях света, в котором участвуют периферические части ретины, — менее чувствительные к цветам.

Ясно, что все сказанное нами относительно психологических моментов при восприятии яркостей, в полной мере относится конечно и к передаче цветов. Для того чтобы изображение являло собой правильную репродукцию передаваемого оригинала, оно должно точно передавать его ступени яркости при условии, что снимок рассматривается при одинаковом освещении и при том же состоянии адаптации глаза, как и первоначально рассматривавшийся об'ект. На практике такая передача достигается очень




**68.** Кривая чувствительности нормального, недальтонического, глаза. По оси абсцисс отложены длины волн, а по оси ординат— величины яркости. Кривой *a* отвечает зрение при большой яркости, кривой *b*—при малой.




**69.** Графическое изображение поглощающего действия фильтра на различные длины волн.

редко и она едва ли желательна. Фактически репродукция, как раз при больших интенсивностях, основывается на практическом компромиссе, так как (приведем только один пример) фотографическая передача красного и равного ему по яркости желтого в каком-либо предмете одинаковой степенью почернения в изображении повела бы только к ослаблению цветного контраста. В таких случаях фотограф помогает себе тем, что, смотря по обстоятельствам, он или недоисправляет или переисправляет, т. е. с помощью соответствующе подобранных компенсационных светофильтров надлежащим образом регулирует передачу контраста.

### Светофильтры и кратность фильтров

В отношении подробного изложения получаемых с помощью фильтров контрастов, а также применения фильтров отсылаем читателя к главе XI и к соответствующей специальной литературе. Применение фильтра, т. е. поглощающей среды, связано конечно с удлинением времени освещения; коэфициент, показывающий, во сколько раз должно быть увеличено время экспозиции при с'емке с фильтром по сравнению с экспозицией без светофильтра, называется **кратностью** фильтра. Фильтр характеризуется не только кратностью, но и находится в зависимости от кривой цветочувствительности пластинки, что легко обнаружить, сравнивая действие сильно избирательного желтого фильтра на эмульсию, сенсибилизированную эритрозином, и на панхроматическую эмульсию (рис. 69).

Для упрощения допустим, что фильтр поглощает свет, образуя при длине волны в 500 *mμ* резкую границу, что означает полное поглощение ультрафиолетовых и синефиолетовых лучей и ослабленное пропускание зеленых, желтых и красных. В верхней части рис. 69 показано действие такого фильтра на цветочувствительную пластинку, обладающую 97,5%-ной чувствительностью в синефиолетовой области и 2,5%-ной чувствительностью в зеленой области спектра. Наш фильтр поглощает все синефиолетовые лучи, т. е. 97,5% актиничного для пластинки света, и потому вре-

мя экспозиции необходимо увеличить в 40 раз, следовательно множитель будет 40. В нижней части диаграммы изображено действие этого же самого фильтра на панхроматическую пластинку, обладающую 87,5%-ной чувствительностью в синефиолетовой и 12,5%-ной чувствительностью в зеленой и красной областях. Здесь фильтр поглощает 87,5% актиничного для пластинки света, и время экспозиции возрастает восьмикратно. Таким образом кратность одного и того же фильтра в одном случае 40, а в другом — 8.

### Специальные фильтры

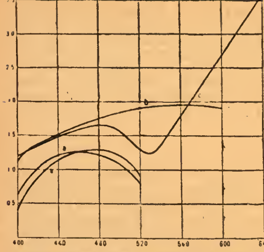
Специальные фильтры, как например монохроматические для спектральной фотографии, контрастные для микрофотографии и т. д., будут описаны в отдельных специальных главах этой книги. Здесь же мы хотим упомянуть только о монохроматических фильтрах для рассматривания предметов, позволяющих фотографам элиминировать сильную разницу в цветах и видеть распределение яркостей в об'екте таким, каким его может передать панхроматическая пленка или пластинка. Пользуясь случаем, отмечаем, что геометрически-оптические свойства фильтра так же важны, как и его окраска. Фильтр плохого качества в оптическом отношении может значительно ухудшить работу хорошего фотографического об'ектива, почему следует тщательно испытывать фильтры в отношении их геометрически-оптических качеств (плоскопараллельность и т. д.).

### Придание цветочувствительности

Первоначальные методы сенсибилизации эозином и эритрозином простирались только в желто-зеленую область спектра. Введение (Мите) изоцианинов и еще больше родственных им карбоцианинов (Е. Кениг) позволило распространить чувствительность эмульсии на весь спектр.

Препарированные такого рода красителями пластинки называются панхроматическими. Раньше пластинки купали в разбавленном спиртовом растворе красителя и таким образом очувствляли их. Соответствующие красители очень чувствительны к кислотам, поэтому приготовление таких панхроматических пластинок требует большой тщательности и уменья. В настоящее время в продаже уже имеются фабричные панхроматические пластинки (чувствительные к красному), и потому больше нет нужды самостоятельно их приготовлять, исключая случаев, когда требуются особо чувствительные пластинки или же специальные пластинки для спектроскопических или астрономических целей, обладающие чувствительностью к инфракрасной области спектра.

Градация (контраст) обыкновенных фотографических пластинок зависит от цвета применяемого при с'емке света. В этом направлении желательно возможно большее число исследований в отношении ортохроматических пластинок, так как для панхроматических пластинок установлено, что различия в градации в зави-

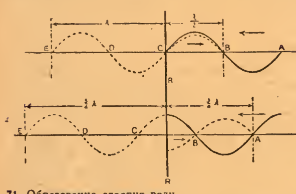



**70.** Изменение гаммы с длиной волны у различных сортов пластинок. По оси абсцисс отложены длины волн, а по оси ординат — величины $\gamma$. Кривые $a$ и $a^1$ отвечают двум различным сортам обыкновенных пластинок, $b$ — ортохроматической и $c$ — панхроматической пластинкам.

симости от воздействия разных цветов могут быть очень велики — обстоятельство, имеющее большое значение в трехцветной фотографии (рис. 70).

### Прямая цветная фотография

Имеется два прямых метода цветной фотографии; оба базируются на открытии Зеебекка, что хлористое серебро способно передавать, хотя и не вполне удовлетворительно, цвета спектра. Хотя упомянутое открытие очень интересно в историческом и в научном отношении, но оно (или, вернее, свойство хлористого серебра, выражаясь точнее — фотохлорида) непосредственно не привело к решению нашей проблемы. Е. Беккерель воспроизводил спектр на серебряных пластинках, покрытых путем погружения в хлорную воду тонким слоем хлористого серебра. Можно было бы свести, как представлял себе Ценкнер, этот вид цветной фотографии к возникновению стоячих волн, если бы такое объяснение не было связано с усложнением вопроса ввиду необходимости допустить «выцветание» или «приспособление» (адаптацию) цветов фотогалоида. Из двух прямых способов цветной фотографии, в основе родственных друг другу, один основан на физическом процессе интерференции колебаний, а второй на химическом процессе — на создании подвижного химического равновесия.




**71.** Образование стоячих волн

### Цветная фотография, основанная на интерференции

Первым, утверждавшим возможность цветной фотографии путем создания стоячих волн, был Ценкер, а практически пригодный

способ такого вида цветной фотографии был предложен Г. Липманом. Физические принципы, на которых основан этот способ, изображены на рис. 71.

Когда ряд последовательных волн падает на среду с меньшим показателем преломления, то происходит частичное отражение без смещения фаз. Если же свет падает на среду с большей плотностью, то при отражении (изменений направления) получается смещение фазы на полдлины волны. На рис. 71 *(1)* волна *ABC* падает на поверхность *R* раздела с более преломляющей средой. Если бы такой среды не имелось, волновое движение за время *t* распространилось бы до *E*. Когда же волна отражается, то за то же время она (изображена пунктиром) вместо точки *A* достигает только точки *B;* это значит, что волновое движение задержалось на половину длины волны ($\frac{\lambda}{2}$, причем $\lambda$ означает длину волны света). В нижней части *(2)* рис. 71, показано дальнейшее распространение ряда последовательных волн (через $\frac{\lambda}{4}$): вместо исчезающего максимума падающей волны, в отраженной волне оказывается минимум.

Допустим, что распространяющаяся волна падает на сильно отражающую среду, тогда ее энергия после отражения уменьшится очень мало или останется почти неизменной. Падающие и отраженные волны будут интерферировать, в результате чего возникнут стоячие волны. Максимумы и минимумы интенсивности попеременно располагаются на расстоянии $\frac{\lambda}{2}$ друг от друга. Мы принимаем, что некоторый светочувствительный материал граничит с сильно отражающей поверхностью; пусть это будет например бромосеребряная эмульсия без зерна, приведенная в контакт с поверхностью ртути, — комбинация, фактически использованная Липманом. В этих условиях при экспозиции на свету определенной длины волны в светочувствительном слое фотохимическое превращение будет происходить таким образом, что как максимумы, так и минимумы действия будут находиться друг от друга на расстоянии $\frac{\lambda}{2}$, (в узлах стоячей волны). При проявлении изображения, т. е. освещённого слоя бромистого серебра, в местах максимумов действия образуются серебряные осадки. Свет каждого цвета образует свою собственную систему элементарных зеркал, которые будут частью пропускать, а частью отражать свет. Когда эти слои (после фиксирования, сушки и т. д.) будут освещены белым светом, то каждый отразит какую-то часть падающего света. Для элементарных зеркал, отстоящих друг от друга на $\frac{\lambda}{2}$, причем $\lambda$ соответствует например длине волны красного света, красные лучи (волны) имеют разность хода в $\frac{\lambda}{2}$ (при

падении) плюс $\frac{\lambda}{2}$ (при отражении); поэтому они друг друга усилят, и в результате получится отраженный красный луч. Аналогичное справедливо и в отношении другиx цветов.
Нейгаусс, Сениор, Айвс и др. доказали фактическое наличие такого рода элементарных зеркал, получая микрофотограммы слоев Липмана; измеренные расстояния между отдельными слоями вполне совпадали с теорией.

### Способ выцветания, или приспособления к цвету

Этот фотохимический прямой способ явился развитием опытов Зеебекка, Беккереля, Пуатвэна и др. над фотохлоридом. Это вещество позволяет частично передать спектр. Полученное изображение не может быть фиксировано[1] и не отличается устойчивостью даже в темноте; на белом свету оно чрезвычайно быстро разрушается. Этот способ противопоставляется описанной выше интерференционной цветной фотографии по следующим причинам: в способе выцветания не требуется никакой отражающей подложки для светочувствительного слоя, и цвета изображения не зависят от угла, под которым изображение рассматривается. Цвета, образующиеся при выцветании, являются настоящими красками (Körperfarben) и образуются путем поглощения или избирательного резонанса.
Раньше мы установили, что всякое фотохимическое превращение вызывается поглощенным светом. Фотохлорид в широких пределах его состава $AgCl(Ag : AgCl)Ag$ светочувствителен, но подлинная чувствительность достигает известного предела, когда содержание серебра на несколько процентов превышает содержание $AgCl$. Чувствительность фотохлорида можно об'яснить тем, что наступает либо почернение в соответствии с уравнением $AgCl \rightarrow Ag$, либо выцветание или потускнение согласно уравнению $Ag + Cl \rightarrow AgCl$. Допустим, что перед нами система в стадии, при которой имеет место максимальное поглощение всех длин волн видимого спектра: окраска системы таким образом приближается к нейтральному черному или серому. Когда мы подвергаем ее экспозиции монохроматическим светом, то в ней устанавливается такое равновесное состояние, что активация данным монохроматическим светом будет минимальной. Если этот свет сильно преломляется, то он будет и сильнее отражаться. Система будет избирательно отражать падающий луч и оставаться нечувствительной к дальнейшей активизации. Если для всех лучей спектра создать одинаковые возможности, то при последующем рассматривании изображения на белом свету каждый участок, освещенный до этого светом какого-либо определенного цвета, будет избирательно отражать соответствующий луч из пучка лучей белого света, в результате чего и получится передача цветов.

[1] В последнее время (см. доклад Ф. Формштехера VIII междун. фотографическому конгрессу—Phot Ind., стр. 957, 1931), уже удалось добиться фиксирования изображений, получаемых из фотохлориде. (Прим. переводчика).

Развитие способа цветного приспособления, или выцветания, сделало значительные шаги вперед, когда стали применять смеси светочувствительных красок, т. е. красок, выцветающих почти до полного обесцвечивания (при поглощении ультрафиолетового света). Эти краски смешиваются таким образом, чтобы получить нейтрально черный цвет; обычно для предотвращения промежуточных химических реакций они наносятся в несколько слоев. О применяемых на практике способах работы по Ворелю, И. Смиту и др. см. главу XI — цветную фотографию.

Способы непрямой трехцветной (или двухцветной) фотографии подробно будут рассмотрены в другой главе и потому здесь о них излишне говорить. Названные способы базируются не только на простых физических или химических основах, но и на эмпирически обоснованном факте, что природные цвета могут быть изображены смешением трех или двух основных цветов (взятых в соответствующих количественных отношениях).

## Литература


E. Valenta, Die Photographie in natürlichen Farben mit besonderer Berücksichtigung des Lippmannschen Verfahrens sowie jener Methoden, welche bei einmaliger Belichtung ein Bild in Farben liefern. 3. Aufl, im Druck, Halle a. S, W. Knapp.

W. Zenker, Lehrbuch der Photochromie, neu herausgegeben von B. Schwalbe, Braunschweig, F. Vieweg & Sohn, 1900.

B. Donath, Die Grundlagen der Farbenphotographie, Sammlung: „Die Wissenschaft, Bd. 14, Braunschweig. F. Vieweg & Sohn, 1906.

H. Lehmann, Beiträge zur Theorie und Praxis der direkten Farbenphotographie mittels stehender Lichtwellen nach Lippmanns Methode, Freiburg i. Br. C. Trömers Universitätsbuchhandlung, 1906.

Edmond Becquerel, Annales de chimie et de physique, Ser. 3, Bd. 22 S. 451, 1848, Bd. 25, S. 447, 1849.

Edmond Becquerel, La lumière, ses causes et ses effets, Bd. II, Livre III, Paris, Librairie de Firmin Didot Frères, Fils & Comp., 1868.

G. L. Lindsay Johnson, Photography in Colours, London, G. Routledge & Sons Ltd. (4 Aufl.), 1925.

O. Wiener, Über Farbenphotographie und verwandte naturwissenschaftliche Fragen. (Vortrag, gehalten auf der 80. Naturforscherversammlung zu Köln a. Rh., 1908). Leipzig, J. A. Barth, 1909.

E. J. Wall, Practical Color Photography, Boston (U. S. A.) Massachusetts, American Photographic Publishing Co., 1922.

4 ГЛАВА

# АСТРОФОТОГРАФИЯ

ЧАРЛЬЗ ДАВИДСОН

## Фотографический рефрактор

Фотографический рефрактор — это в основном экваториально монтированная двойная зрительная труба, снабженная надежным часовым механизмом для того, чтобы она могла следовать суточному движению звезд. Такой телескоп позволяет делать точную установку на подлежащий фотографированию об'ект.

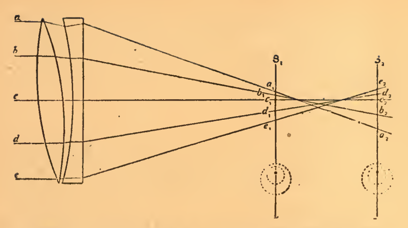
Один из об'ективов исправлен в отношении актиничных лучей[1] для того, чтобы избежать ошибок при их действии на фотографическую пластинку. Второй об'ектив исправлен визуально (оптически). Последний служит только для целей одиентировки, так как наблюдатель пользуется второй зрительной трубой только для наводки на об'ект. Кроме того с помощью второй зрительной трубы он может констатировать общие неравномерности движущего механизма и на основании этих данных, пользуясь соответствующими вспомогательными средствами, заботиться о том, чтобы фотографический об'ектив постоянно оставался направленным на одну и ту же часть неба. Нормальный об'ектив, признанный на Парижском конгрессе отвечающим астрофотографическим целям, обладал отверстием около 330 *мм* и фокусным расстоянием около 3 480 *мм;* угол поля зрения равнялся приблизительно 2°, а увеличение было таково, что линия протяжением в 1 *мм* на изображении отвечала углу поля зрения (со стороны об'екта) в 1 дуговую минуту. Об'ектив был исправлен сферически и хроматически для области около $\lambda = 430$ *м*μ, причем особенное внимание было обращено на выполнение условия синусов. Последнее обстоятельство особенно важно, иначе кома искажает изображения, лежащие по краю поля изображения, и вследствие неравномерного распределения яркости в точке изображения происходит сме-

[1] Физико-химические свойства эмульсии, важные в астрофотографии, уже рассмотрены нами выше.

щение центра точки изображения. Искатель, имеющий одинаковое фокусное расстояние с астрофотографической трубой, неподвижно скреплен с последней на обоих концах и посередине в целях предотвращения сгибания обеих труб относительно друг друга. Окуляр монтирован на крестообразных салазках, и потому его можно устанавливать на всякую звезду, находящуюся в любой части поля зрения.

## Регулировка рефрактора

Свободное от дисторсии астрофотографическое изображение представляет проекцию небесного свода на плоскость, касательную к нему и представленную фотографической пластинкой. Оптическая ось об'ектива должна быть перпендикулярна к пластинке и проходить через ее середину. Для того чтобы возможно было выполнить это условие, об'ектив устанавливают таким образом, чтобы его можно было передвигать с помощью трех откидных винтов; пластинка в рефракторе покоится на трех юстируемых подставках. Необходимая регулировка производится с помощью небольшой коллиматорной зрительной трубы, монтированной на треноге; тренога стоит на трех установочных винтах. В фокальной плоскости коллиматорной зрительной трубы имеется стеклянная пластинка со шкалой, служащая микрометром. Середина об'ектива зрительной трубы обозначается либо небольшим кусочком бумаги, наклеенным на передней поверхности об'ектива, либо скрещением нитей, натягиваемых под прямым углом друг к другу от края до края оправы об'ектива. Аналогичным же образом может быть обозначен центр пластинки. Коллиматорную зрительную трубу или, вернее, ее треножную подставку помещают на наружной части поверхности об'ектива и смотрят сквозь трубу на пластинку, находящуюся в фокальной плоскости об'ектива рефрактора; вращают установочные винты подставки коллиматора (соответственно внешней шаровой поверхности об'ектива) до тех пор, пока оптическая ось коллиматорной зрительной трубы установится параллельно оптической оси фотографического рефрактора, и тогда обозначенный отметкой центр пластинки будет виден против какого-нибудь определенного деления шкалы микрометрической пластинки, которое можно точно отсчитать. После этого коллиматор укрепляют на диаметрально противоположную часть об'ектива и снова прочитывают положение центра пластинки на микрометрической шкале. Отклонение оптической оси об'ектива от центра пластинки равно полуразности полученных отсчетов. Теперь с помощью установленных винтов можно совместить ось об'ектива с центром пластинки. Для отрегулирования положения несущих пластинку подставок коллиматорная зрительная труба свинчивается со своей треножной поставки и укрепляется в центре металлической пластинки, имеющей тот же формат, что и фотографическая пластинка. После этого отмеченный центр об'ектива наблюдается в коллиматорную зрительную трубу, причем упомянутую металлическую пластинку последовательно помещают на подставке пластинке таким образом, что




**72.** Влияние децентрированного состояния линз об'ектива зрительной трубы на внефокальные изображения точечного об'екта.

бы во втором положении пластинка была повернута на 180° от первоначального. Тогда полуразность отсчетов по микрометру будет равна угловому отклонению пластинки от искомого положения, перпендикулярного оптической оси об'ектива, регулировка достигается соответствующим передвижением несущих пластинку подставок.

После того как с достаточной точностью проделана описанная регулировка, определяют длину фокусного расстояния об'ектива. Для этого делают ряд снимков какой-либо звезды в разных положениях, в пределах области фокусировки (на небольших расстояниях друг от друга), причем после каждой экспозиции пластинка передвигается.

Безукоризненная резкость по всей поверхности пластинки недостижима вследствие неустранимого до конца искривления поверхности изображения, но зато путем уравнения резкости изображения в центре и по краям можно добиться равномерной средней резкости.

Об'ективы малого диаметра при изготовлении монтируются таким образом, что линза из крона и линза из флинта неподвижно закреплены в них друг за другом в одной и той же оправе. Если при испытании оказалось, что линзы размещены правильно, то не следует ничего менять в их взаимном положении. Линзы большого диаметра монтированы таким образом, что линза из крона и линза из флинта вставлены в телескоп каждая в самостоятельной оправе. В обеих конструкциях следует проверять, безукоризнена ли центрировка; поэтому постараемся об'яснить, в чем заключается это испытание.

Нормальный об'ектив составлен из двух линз: передней — двояковыпуклой, сделанной из кронового стекла, и задней — плосковогнутой, из флинтового стекла. Если линзы юстированы правильно, их главные оптические оси должны совпадать; при плохой юстировке они будут наклонены друг к другу или же децентрированы. Когда ошибка велика, она очень заметно сказывается

в искажении (оптическом) изображений звезды; если мала, то ее можно обнаружить при рассматривании внефокальных изображений: при безукоризненной центрировке внефокальное изображение представляется состоящим из концентрических колец (зон); наклонное положение линз друг к другу сказывается в том, что зонные кольца расположены эксцентрично.

Из рис. 72 видно, что зоны сближаются в том направлении, в котором линзы дальше отстоят друг от друга. Для устранения этого недостатка нужно часть, включающую линзу из крона, приблизить к части, включающей линзу из флинтового стекла, — с той стороны, где имеется приспособление для сближения колец. Наблюдающаяся иногда эксцентричность оптических осей обеих линз относительно друг друга устраняется аналогичным образом. Простая позитивная линза собирает красные лучи в фокусной точке, отстоящей от линзы дальше, чем точка пересечения синих лучей. Путем комбинации линз из крона и из флинта упомянутое цветное отклонение можно частично устранить. Лучи двух различных длин волн (лежащие по обе стороны соответствующе выбранной длины волны) соединяют в одной общей фокусной точке в плоскости, минимально отстоящей от фокальной плоскости. Все лучи, отличающиеся от принятой предельной длины волны, будут собраны линзой на расстояниях бо́льших, чем расстояние минимально удаленной фокальной плоскости.

В фотографическом об'ективе рефрактора, представляющем простую комбинацию линз из крона и флинта, в одной плоскости собираются лучи с $\lambda$ приблизительно от 4 000 до 4 800 Å. Ультрафиолетовые и инфракрасные лучи сходятся в более удаленной фокальной плоскости. Край линзы из крона можно рассматривать как призму с определенным углом преломления. Производимая этой призмой дисперсия лучей света компенсируется краевой частью линзы из флинта, которую в свою очередь можно также рассматривать, как призму. Допустим, что линза из крона стоит эксцентрично (т. е. децентрирована), причем так, что она выдвинута относительно линзы из флинта; тогда угол призмы у линзы из крона слишком мал по сравнению с углом у линзы из флинта. В этом случае имеет место переисправление, и изображение точки искажается, превращаясь в короткий спектр, причем в этом спектре фиолетовый конец лежит в том направлении, в котором линза из крона децентрирована. Если ошибка велика, явление это очень заметно и легко может быть устранено; если же ошибка мала или уменьшена путем произведенной регулировки, то при правильном наклоне линз во внефокальных плоскостях точка дает изображения с концентрическими кругами, ядро которых однако лежит эксцентрично. Это ядро образуется ультрафиолетовым светом, фокус которого лежит за фокусом синих лучей. Это справедливо для снимков на обыкновенных фотографических пластинках.

При пользовании цветочувствительными пластинками наблюдается второе ядро изображения, зависящее от красного света и лежащее в направлении, противоположном положению ядра, образованного ультрафиолетовым светом. При желании устранить

эту ошибку нужно сместить линзу из крона в направлении, в котором передвинулось бы эксцентричное фиолетовое ядро, чтобы попасть в середину.

### Промер изображений звезд, система координат для отсчета

Когда возник план составления фотографической звездной карты всего неба, последнее было разбито на ряд полей, соответственно телесному углу в 2°, определенным образом расположенных. Для облегчения последующего промера изображений звезд середины полей расположили таким образом, что они приходились на содержащую целое число градусов прямую круга склонения и находились друг от друга на расстоянии 2°. Для полноты решено было делать вторую серию снимков, середины полей которых вдоль содержащей нецелое число градусов прямой круга склонения совпадали со средними прямыми восхождениями. Таким образом центры полей второй группы попадали на край полей первой группы. Следовательно, если на первом снимке звезда расположена неудобно, ее можно более успешно промерить на второй пластинке, которая по положению перекрывает первую.

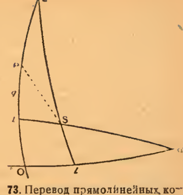
Выбирается подходящая звезда в качестве «исходной звезды» (Leitstern) и определяются ее прямоугольные координаты с учетом середины поля, принимаемой за начало. Если зрительная труба с учетом прямого восхождения и склонения направлена на середину поля, а окуляр ориентирной зрительной трубы с помощью крестообразных салазок установлен на вычисленные координаты исходной звезды, то последняя должна оказаться в точке скрещения нитей окуляра.

В фокальной плоскости окуляра натянуты две нити, пересекающиеся под прямым углом. Наблюдатель совмещает точку скрещения нитей с фиксируемой звездой и следит за тем, чтобы это положение сохранялось в течение всей с'емки; от точности проведения этой операции зависит пригодность получаемого снимка. Когда фотограмма готова, приступают к промеру пластинки для определения положения отдельных звезд на фотограмме.

Совершенно так же, как положение какого-либо места на земной поверхности определяется его долготой и широтой, и положение звезды на небесном своде определяется аналогичными координатами, т. е. склонением и прямым восхождением, которые однако не могут быть прямо измерены на фотографическом снимке. Астрофотографический снимок в основном есть проекция небесного свода (небесной сферы) из проекционного центра (центра об'ектива) на касательно проведенную плоскость (фотографическую пластинку). Отсюда следует, что большой круг небесной сферы проектируется на пластинке в виде прямой линии и, обратно, прямая линия на пластинке соответствует большому кругу на небесной сфере. Отсюда следует, что измерение на фотографии прямолинейных координат вполне обосновано.

Пусть $O$ на рис. 73 есть центр пластинки, $K$ и $L$ — полосы большого круга $OK$ или $OL$ на небесной сфере, $P$ — северный полюс небесной сферы.

Обозначим через $A$ или $P$ прямое восхождение, или соответственно расстояние от северного полюса центра пластинки $O$, а через $a$ и $p$ — прямое восхождение, или расстояния от северного полюса какой-нибудь звезды на пластинке.




73. Перевод прямолинейных координат на снимке звезды и прямое восхождение и склонение, и обратно.

Далее пусть:

$$PS = p, \quad OP = P, \quad OPS = a - A.$$

$\operatorname{tg} Ol$ есть $x$-ордината звезды $S$,

$\operatorname{tg} Ok$ есть $y$-ордината звезды $S$.

Принимаем, что

$$Pk = q, \quad \operatorname{tg} q = \operatorname{tg} p \cos (a - A),$$

$$Ok = P - q,$$

$$y = \operatorname{tg} (P - q) \qquad 1$$

$$\operatorname{tg} Ol = \frac{\operatorname{tg} kS}{\cos (P - q)},$$

$$\operatorname{tg} kS = \operatorname{tg} (a - A) \sin q,$$

$$x = \operatorname{tg} Ol = \operatorname{tg} (a - A) \sin q \sec (P - q) \qquad 2$$

С помощью вышеприведенных уравнений можно, с одной стороны, превратить прямое восхождение и отклонение в прямолинейные координаты, а с другой — по измеренным прямолинейным координатам вычислить прямое восхождение и склонение звезды. До проведения такого превращения следует, пользуясь константами пластинки, исправить измеренную величину координат.

Константы пластинки следующие: а) фактический масштаб снимка; его необходимо учесть ввиду существующей разницы между принятой и фактической длиной фокусного расстояния об'ектива зрительной трубы; б) ориентировка снимка, зависящая от возможно наклонного положения пластинки; в) начало координат: должна быть учтена ошибка, произошедшая при установке (точечной наводке) зрительной трубы.

На пластинке несомненно окажутся звезды, положение (прямое восхождение и склонение) которых до этого уже точно определено с помощью меридианного прибора. Поэтому присущие этим звездам прямолинейные координаты можно вычислить, пользуясь вышеприведенными уравнениями. Эти координаты будут **контрольными** координатами $X$ и $У$.

Сравнивая вычисленные координаты с измеренными в фотограмме координатами x и y тех же звезд, можно составить следующие уравнения:

$$ax + by + c = X - x$$

$$dx + ey + f = Y - y,$$

где $a$ и $e$ — поправочные члены для масштаба, $b$ и $d$ — для ориентировки, $c$ и $f$ — для положения отправной точки.

Оказывается, что достаточно трех звезд для получения всех необходимых констант пластинки. Конечно очень желательно знать контрольные координаты многих звезд, хотя бы до 20 для каждой пластинки. Пользуясь полученными поправочными членами, исправляют все измеренные координаты звезд, после чего можно вычислить их прямые восхождения и склонения [1].

Прежде астрономы пытались с предельной точностью определить положение более ярких звезд на небе и фиксировать его путем указания прямого восхождения и склонения. Продолжительное наблюдение выяснило однако в дальнейшем, что положение звезды вовсе не неизменно; оказалось необходимым определять или, вернее, исследовать, исходя из наблюдаемого движения, точность эквинокций, нутацию и наконец аберрацию света.

Когда одна и та же звезда вторично наблюдается по истечении продолжительного времени, то можно установить некоторое, незначительное (характерное для данной звезды) смещение, в силу чего это движение и называется собственным движением. Таким образом, когда на фотографических снимках звезд, сделанных спустя некоторое время, обнаруживаются по сравнению с прежними снимками определенные отклонения, то исходя из них, можно вывести собственное движение звезды.

Фотографический снимок звезд всегда содержит значительно большее количество звезд, чем можно их наблюдать меридиальным инструментом или каким-либо иным образом. Определение точной позиции звезд на небе не имеет решающего значения; в гораздо большей степени важно их собственное движение. Если по прошествии определенного промежутка времени сделать второй снимок того же самого поля, то измеренные координаты второго снимка можно сравнить с координатами первого и на основании этого составить формулы нижеследующего вида:

$$ax + by + c = x_1 - x_2 \quad \text{и т. д.}$$

по получающимся разностям в правой части можно судить о собственном движении.

## Промер фотограмм звезд

Простой и притом очень точный прибор для промера изображений звезд описан в Publication Yerkes and Allegheny Observatorium. Этот прибор в основном состоит из длинного, очень точно нарезанного измерительного винта, с помощью которого горизонтально перемещается на салазках микроскоп. Фотографическая пластинка помещается на других салазках, на которых она может передвигаться перпендикулярно к направлению движения винта в тех случаях, когда должны быть промерены звезды с различными $y$-координатами. При посредстве нити, помещенной в фокальной плоскости микроскопа, изображение звезды делится по-

[1] Turner, Astron, Soc. Notices, November, 1893.

полам, и $x$-координата измеряется количеством оборотов винта (Revolutionen). После этого пластинка поворачивается на 90° и определяется $y$-кордината отдельных изображений звезд. Можно перемещать салазки пластинки с помощью винта и в $y$-направлении, если хотят измерять обе координаты, не прибегая к поворачиванию пластинки.

Ясно, что и салазки и винтовой механизм должны быть сделаны очень тщательно. При продолжительных работах необходимо принимать во внимание температурные колебания вследствие приближения наблюдателя к прибору и других причин.

В тех случаях, когда фотографическая пластинка содержит очень много изображений звезд, ее промер занимает много часов, и потому упомянутое обстоятельство несомненно может оказаться существенным. По этой причине очень удобно при промерах снимков пользоваться решеткой, сначала применявшейся для установления возможных случайных сморщиваний и искажений светочувствительных слоев.

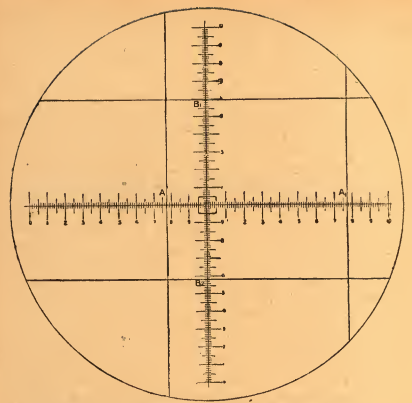
Решетка (réseau) представляет пластинку шлифованного и отполированного оптического стекла, на которой нанесен слой серебра. На серебряном слое выгравировывается сеточка из прямых линий, находящихся в $x$- и $y$-направлениях на одинаковых расстояниях друг от друга. Эти линии прозрачны. Снимки звезд перед проявлением приводятся в контакт с решеткой и коротко освещаются параллельным светом.

На негативе после проявления получается сетка, состоящая из черных линий, которыми пластинка разделена на маленькие квадраты (сторона квадрата обычно равна 5 *мм*). После этого с помощью подходящей микрометрической измерительной установки очень легко промерить положение звезды в таком квадрате.

Установлено, что промеры сетки на негативе отличаются от соответствующих им измерений самой сетки (оригинала) почти на 0,001 *мм*, поэтому описанным методом нельзя пользоваться для особо точных измерений. Во всех прочих случаях этот метод очень употребителен, так как сетка остается постоянной, и поэтому промеры можно прерывать, а в дальнейшем проверять и также дополнять.

Линии сетки обозначены цифрами в порядке возрастания прямого восхождения и склонения. Координаты звезды определяются цифрами, стоящими у линий, предшествующих в соответствующем направлении изображению звезды, а также долей интервала до следующей линии, измеряемой с помощью микроскопа. Если необходима бо́льшая точность, то при измерении пользуются микрометрическим винтом. Когда такие измерения предназначаются для составления астрофотографического каталога, для чего необходимы особо многочисленные промеры, приходится отказаться от микрометрического винта и воспользоваться другим, хотя и менее точным, но быстрее ведущим к цели методом, к описанию которого мы и переходим (рис. 74).

В фокальной плоскости микроскопа вместо креста нитей помещается стеклянная пластинка; измерительный винт отсутствует; стеклянная пластинка снабжена двумя шкалами, пересекающими-




**74.** Пластинка с двумя взаимно перпендикулярными шкалами

ся под прямым углом. Шкала разделена таким образом, что 100 делений шкалы отвечают одному интервалу сетки. В каждой шкале имеется 200 делений, поэтому она всегда должна пересекаться двумя линиями сетки. Цифровое обозначение нанесено таким образом, что у крайней левой черточки стоит 0, посередине число — 100, а у крайней правой — снова число 100. Вертикальная шкала аналогично обозначена снизу к середине и от середины вверх (рис. 74). Если изображение звезды лежит в точке пересечения обеих шкал, то отыскивается расстояние от правой линии сетки путем отсчета по шкале от того места, где последняя пересекается линией сетки. Аналогичным же путем определяется расстояние от лежащей влево линии сетки. Когда микроскоп установлен таким образом, что изображение сетки в точности совпадает со шкалой, отсчеты вправо и влево от вертикальной линии будут совпадать. Если же, что обычно и будет иметь место, юстировка несколько неточна, то соответствующая доля получающихся при отсчете разностей должна быть использована для исправления отсчетов с правой стороны. Таковы же соотношения при отсчете по шкале $y$. Для астрофотографических целей пользуются сетками с расстоянием между линиями в 5 *мм*. Так как измерительная шкала разделена на 100 частей и наблюдатель в состоянии

отсчитывать десятые доли интервала между штрихами, то можно отсчитывать с точностью до одной тысячной доли интервала сетки (расстояния между ее линиями), т. е. мы в состоянии промерить 0,005 *мм*, что в астрофотографической системе измерения отвечает 0,3 дуговой секунды. Может вероятно показаться, что точность таких измерений невелика, но данные опытов говорят, что, выводя среднее из целого ряда таких измерений, можно достигнуть удовлетворительной точности. Изложенным выше способом промеряется каждая отдельная звезда, имеющаяся на пластинке, т. е. ее положение определяется величиной координат $x$ и $y$.

Для определения собственного движения звезд часто необходимо сравнить между собой два фотографические снимка одного и того же поля, сделанные в разное время, например спустя 20 лет один после другого. Подобные снимки сравниваются таким образом, что в обеих пластинках промеряются координаты звезд и между ними устанавливается математическая зависимость; этот метод описан нами выше. Если оба сравниваемые снимка сделаны разными инструментами, то только что упомянутый метод сравнения и есть единственно возможный; если же в обоих случаях снимки сделаны одним и тем же рефрактором, тогда возможны способы, необязательно заключающиеся в прямом измерении координат.

Прибор, предназначенный для такого сравнения, в основном состоит из рамы, монтированной на салазках, в которую могут быть заложены обе пластинки. Пластинки рассматриваются двумя микроскопами, укрепленными на салазках, поставленных под прямым углом к первым салазкам. Расстояние между обоими микроскопами равно расстоянию между двумя соответственными точками на пластинке. Оба снимка делаются при почти одинаковом прямом восхождении и склонении, незначительные разницы поддаются исправлению. Если установить левый микроскоп на какую-нибудь звезду левой пластинки, то соответственная звезда правой пластинки оказывается лежащей вправо от середины поля правого микроскопа. Разность координат получится, если точно (точечно) установить на левое изображение звезды и отсчитать половину расстояния правого изображения от центра поля зрения правого микроскопа. Таким путем определяется разность координат обоих изображений звезды. Исправление неточностей из-за не вполне точечной установки звезды и ориентировки снимка делается математическим путем на основании формул:

$$ax + by + c = x_1 - x_2,$$
$$dx + ey + f = y_1 - y_2.$$

Другой тип прибора, предназначенного для подобных измерений, основан на следующем принципе: оба изображения звезды, видимые в микроскопы, сводятся системой призм в один общий окуляр. Позади окуляра имеется зеркало, с помощью которого наблюдатель может вводить в поле зрения окуляра то одно, то другое изображение микроскопа. Сначала вращением зеркала в

окуляр вводится левое изображение и определяется половина расстояния изображения звезды от скрещения нитей микроскопа, затем последующим вращением зеркала вводят в окуляр изображение правого микроскопа; расстояние этого изображения от места скрещения нитей тоже делится пополам. Разность положений обоих изображений звезды относительно точки скрещения нитей позволяет сравнивать оба снимка.

Если двойного микроскопа в нашем распоряжении не имеется, то для прямого сравнения обоих снимков, можно использовать другой метод, также дающий хорошие результаты. Второй (сравниваемый) снимок делают таким образом, что пластинку закладывают обратной, т. е. стеклянной, стороной к об'ективу и при сравнении обе пластинки складываются слоем к слою. Если пластинки скрепить неподвижно, то обе фотограммы можно рассматривать, как один, дважды экспонированный снимок; взаимные смещения изображений промеряются в одном микроскопе.

Опыты показали, что в этом методе при пользовании для пластинок обыкновенным стеклом ошибки оказываются порядка микрона (едва ли больше), а в случае применения «оптически обработанного», т. е. шлифованного и полированного стекла, получающимися ошибками можно почти пренебречь. Остающиеся ошибки могут быть совершенно элиминированы, если пластинка, вкладываемая обратной стороной, используется только как «промежуточная измерительная шкала» (Zwischenmesskala), с помощью которой сравнивают две или несколько пластинок. Этот метод, хотя он и связан с некоторым усложнением работы, следует предпочесть: он обладает тем преимуществом, что работающий не оказывается связанным определенными парами пластинок, а может сравнивать любое число пластинок, причем каждой в отдельности присущ (в отношении точности) определенный «вес».

Конечно салазки измерительного прибора (какого бы устройства они ни были) должны быть сделаны безукоризненно. Температурные влияния тоже должны быть исключены. В последнем описанном методе, при котором пластинки складываются вместе, температурные влияния играют меньшую роль, так как они действуют в равной мере на обе пластинки.

## Фотометрия звезд

Яркость, присущая звезде, является первым признаком ее величины; кроме того яркость служит отправной точкой при исчислении расстояния до звезды. Поэтому определение так называемой «кажущейся величины» звезд имеет важное значение.

Вычисления величины звезд делались уже около 2 000 лет назад. Мы находим их уже в Almagest Птоломея. В этом сочинении звезды по величине разделены на 6 классов. В первый класс входят самые яркие, а в шестой — самые слабые звезды, поскольку они различимы невооруженным глазом. Эта классификация сохранилась до наших дней. Астрономы, жившие позже, придерживались при определении величины звезд шкалы, соответствовавшей упомянутой выше шкале. При более подробном исследовании оказы-

вается, что примененная шкала является логарифмической: в ней равным промежуткам отвечают равные соотношения яркостей. Шкала эта натуральная, ибо она соответствует природе глаза или, вернее, обусловлена природой глаза (физиологический закон Фехнера). Погсон показал, что частное от деления двух яркостей, соответствующих двум смежным классам величины, представляет почти константу, значение которой может быть принято равным 2,512; логарифм этого числа округленно будет 0,4. Таким образом класс величины $M = \frac{\log \text{яркости}}{0,4}$, а соотношение яркостей двух величин звезд равно 2,512.

Этим методом определения величины обычно пользуются в настоящее время. Е. Пиккеринг в 1879 г. занялся стандартизацией фотометрического наблюдения звезд; до этого не существовало никакого единообразного систематического метода. Он наблюдал с помощью фотометра собственной конструкции свыше 4 000 звезд, вплоть до 6-го класса величины, сравнил их непосредственно с полярной звездой, величину которой (ее яркость) он обозначил цифрой 2, и пользовался при этом распределением по шкале, предложенным Погсоном.

Введя различные исправления с целью приведения сделанных наблюдений в соответствие с наблюдениями Аргеландерса, Пиккеринг предложил основную шкалу распределения по величине, которая постепенно выработалась в окончательном виде. Его предложение основано на визуальном методе. Когда астрономия стала пользоваться услугами фотографии, потребовалась нормальная шкала, основанная на фотографическом базисе, так как визуальная и фотографическая цветочувствительность различны. При подразделении звезд на спектральные классы: *O, B, A, F, G, K, M, N, R*, цвет меняется от синего к красному. Пиккеринг выставил требование такого устройства шкалы, чтобы она базировалась на упомянутой выше оптической шкале. Это требование выполняется таким образом, что устанавливаются следующие условия: белые звезды класса *A* должны иметь по обеим шкалам одинаковую яркость, а следовательно и одинаковую величину. Если известна оптически измеренная величина звезды и ее спектральный тип, то можно приблизительно указать ее фотографическую яркость (величину), если прибавить[1] так называемый «цветной показатель» (см. нижепомещаемую таблицу) к визуально измеренным значениям яркости.

| Спектральный тип: | *B* | *A* | *F* | *G* | *K* | *M* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Цветной показатель: | —0,24 | 0,00 | +0,28 | +0,56 | +1,00 | +1,35 |

Эта таблица годится для более ярких звезд; более слабые звезды нуждаются в иной схеме. В окружности полярной звезды выбрали большое количество звезд, среди которых имеется также много настолько слабых звезд, что их едва можно различить, и различными методами определили их фотографическую яркость.

[1] Harvard Annals, 80, 152.

Таким путем была получена шкала величины, названная «шкалой околополярных звезд». Для измерения «фотографической величины», т. е. яркости звезд, фотографическая пластинка освещается сначала от исследуемой звезды, а затем вторично в области околополярных звезд одинаково продолжительное время. На фотографическом снимке звезды изображаются в виде маленьких кружков, диаметр которых меняется с яркостью. Очертания этих кружков нерезки, так как при этом играют роль, с одной стороны, фотографическая иррадиация (отражение и рассеяние в светочувствительном слое), а с другой — рассеяние света (вследствие колебания воздуха), цветные ошибки об'ектива и другие моменты.

Несмотря на то что изображение звезды не вполне резко, оно все же может быть промерено с достаточной точностью. Измерение яркости происходит таким образом, что диаметр кружка промеряется в обоих полях (в исследуемом поле и в соответствующем поле около полярных звезд); яркость звезд в исследуемом поле находится путем сравнения или интерполяции.

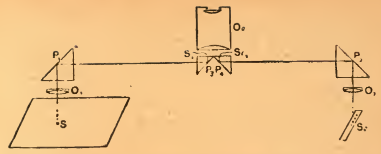
Зависимость между величиной кружка $d$ и величиной (яркостью) звезды $M$ дается следующим эмпирически установленным уравнением:

$$M = m + k\sqrt{d},$$

где $m$ и $k$ — где константы, зависящие от разных обстоятельств. Вышестоящее уравнение дает хорошие результаты для 3—4 средних величин звезд, но оно не должно применяться во всех случаях. Интервалу в 4 величины отвечает интервал яркости около 1 : 40. Если выйти за эти пределы, то оптическое свойство изображения меняется: изображения более ярких звезд обнаруживают ясно выраженное наличие вторичного спектра, а изображения более слабых звезд не имеют достаточной плотности на негативе; в обоих случаях кружки изображения безошибочно не определяются.

Удовлетворительное фотометрирование слабых звезд удается следующим образом. С помощью телескопа приготовляется шкала для сравнения, а именно: на одной пластинке делается ряд снимков одной и той же звезды таким образом, что время экспозиции возрастает в геометрической прогрессии. Полученные этим путем изображения имеют различные плотности, отличающиеся друг от друга на правильную дробь. Эту шкалу помещают в фокальную плоскость окулярного микрометра, т. е. в общую для об'ектива и окуляра фокальную плоскость, и соответствующим передвижением подставки, на которой помещается пластинка для сравнения, приводят исследуемое изображение звезды в такое положение, что оно оказывается между двумя изображениями шкалы сравнения, наиболее подходящими к нему по яркости. Таким путем величину звезды можно определить с точностью до 0,1 единицы шкалы.

В результате таких определений величины отдельных околополярных звезд достигается соответствующая полярная градуировка, с помощью которой возможно непрямое определение величины звезд.




**75.** Схема фотометра для промера изображений звезд

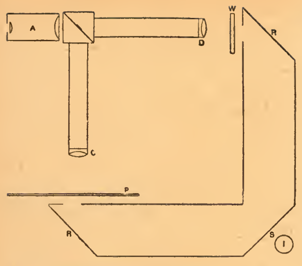
Этот упрощенный метод имеет тот недостаток, что шкала для сравнения проектируется не об'ективом микроскопа в фокальной плоскости окулярного микрометра, в результате чего она кажется оптически иной по сравнению с исследуемыми изображениями звезд.

Другой способ сравнения дал очень удовлетворительные результаты. В нем пользуются двойным микроскопом с двумя об'ективами, из которых один направлен на фотографическое изображение звезды, а второй — на изображение шкалы сравнения. С помощью соответствующих призм оба изображения сводятся в один окуляр; таким образом лежащие рядом изображения шкалы и звезды могут быть сравнены друг с другом.

На рис. 75 $S$ означает фотографическое изображение звезды, $Sc$ — вышеупомянутую шкалу, посредством которой должно быть совершено сравнение. Соответственные пучки лучей проходят через об'ективы $O_1$ или $O_2$ и сквозь призмы $P_1$ или $P_2$ и $P_3$ или $P_4$ и достигают плоскости изображения $S_1Sc_1$; здесь они рассматриваются окуляром $Oc$.

Более точным методом определения яркости (величины) будет метод, в котором используются внефокальные снимки. Этот способ применим лишь тогда, когда звезды достаточно ярки. Фотографическую пластинку вместо того, чтобы освещать в фокальной плоскости, сдвигают настолько, чтобы она пересекала конус лучей еще до его вершины; тогда изображения звезд рисуются на пластинке в виде сравнительно больших кружков с явными ступенями почернения.

Если бы об'ектив фотографического рефрактора был безукоризненно исправлен (как сферически, так и хроматически), то почернение внефокального кружка изображения было бы равномерным. Но так как никакой об'ектив не может быть идеально сконструированным, то во внефокальных кружках рассеяния имеются более или менее ясно выраженные правильные ступени яркости. Удалось найти способы устранения такой ступенчатости. В особенности следует упомянуть метод Шварцшильда, согласно которому пластинка во время освещения приводится в движение специальным механизмом таким образом, что в результате получается равномерно зачерненный кружок, почернение которого меняется с яркостью (штриховальный метод); получающиеся почер-




76. Схема микрофотометра Гартмана

нения измеряются микрофотометром с применением фотографического измерительного клина. Микрофотометр Гартмана — прибор, наиболее часто применяемый для требуемых в данном случае измерений, сконструирован в принципе следующим образом. Оси двух микроскопов *C* и *D* (рис. 76) образуют друг с другом прямой угол и упираются в кубик Люммера-Бродхуна. Кубик Люммера-Бродхуна для астрономических целей состоит из двух прямоугольных и равнобедренных призм, соприкасающихся своими поверхностями. Одна из них посередине высеребрена. Микроскоп *C* направлен на фотографическую пластинку, а микроскоп *D* — на фотографический измерительный клин. Как пластинка, так и измерительный клин освещаются зеркалами (*R*, *R*), отбрасывающими свет от одного и того же источника. Изображения пластинки и измерительного клина видны в люммер-бродхуновском кубике лежащими рядом, а именно так, что изображение пластинки отражается от высеребренной гипотенузной части, в то время как изображение клина появляется в виде кольца вокруг этой средней части.

Окуляром *A* рассматриваются оба граничащие друг с другом изображения, при этом клин можно передвигать до тех пор, пока разница между обоими изображениями исчезнет.

Градуировка клина, т. е. отыскание величины звезд, делается либо при посредстве околополярных звезд, либо с помощью «абсолютной шкалы», получаемой таким путем, что различные места одной пластинки экспонируются от источника света, интенсивность которого меняется систематически (т. е. согласно выбранному соотношению ступеней). При изготовлении абсолютной шкалы можно также соответственно изменять отверстие оптической системы или расстояние до источника света.

## Абсолютная шкала яркости

В первом приближении было принято, что собрание околополярных звезд образует абсолютную шкалу яркости. В действительности же это только приблизительно правильно. Было затрачено много усилий на неоднократные повторные определения величины этих звезд.

Фотохимический закон Бунзена и Роско гласит, что при изменении интенсивности света и времени экспозиции в противоположных направлениях достигается одинаковый фотографический эфект, т. е. что справедливо соотношение

$$E = J \cdot t.$$

Но на основании лабораторных опытов и астрофотографических данных оказалось, что этот закон справедлив не во всех случаях и что с экспериментально наблюденными фактами гораздо лучше согласуется уравнение

$$E = J \quad t^p \ ,$$

где показатель $p$ есть правильная дробь, величина которой колеблется между 0,9 и 1,0. Средняя величина $p$ есть 0,9, но она непостоянна, вследствие чего изменение времени экспозиции не указывает еще меры освещения.

Если изменять отверстие телескопа, то не получается удовлетворительных результатов, так как аберрации об'ектива в середине и по краям неодинаковы и изображения, получаемые при различных отверстиях, имеют различный характер; кроме того положение в середине и по краю об'ектива различно.

Если перед об'ективом поместить грубую решетку, то можно ожидать лучших результатов, так как толщина примененных прутьев, а также их взаимные расстояния известны и потому можно вычислить поглощение, обусловленное наличием решетки. Полезно делать всегда две экспозиции, а именно: одну с решеткой, вторую без нее. Путем соответствующего удлинения времени экспозиции можно должным образом учесть прозрачность воздуха.

## Дифракционные решетки

Если перед об'ективом телескопа поместить решетку, состоящую из толстых взаимно параллельных прутьев, то в обе стороны от проектирующегося в фокусе главного изображения образуются дифракционные спектры в форме изображений звезды (побочные изображения). Некоторая, совершенно определенная доля света отклоняется, проходя мимо прутьев решетки, и дает побочные изображения. Количество отклоненного света зависит от толщины прутьев и расстояний между ними. Таким образом в результате создается совершенно определенное соотношение яркости между центральным и боковыми изображениями звезды. Если мы сравниваем какие-либо две различные звезды, то разница в величине наблюдается между ними тогда, когда центральное изображение одной звезды в отношении величины и почернения соответствует дифракционному (боковому) изображению другой звезды. Отсюда вытекает простой способ определения величины всех звезд на пластинке, исходя из элементов решетки (при этом еще не принято во внимание установление нулевой точки такого рода шкалы).

Особое достоинство метода решетки заключается в том, что боковые изображения возникают одновременно со срединным изоб-

ражением, и поэтому разница в величине не зависит от прозрачности воздуха — достоинство, которым не обладают другие методы, нуждающиеся в вспомогательной экспозиции с задиафрагмированным об'ективом.

Недостатком же этого метода является то обстоятельство, что побочные изображения представляют очень короткие спектры, которые не могут быть вполне безошибочно сравнены с круглым срединным изображением, в особенности в изображениях очень слабых звезд.

Следующий недостаток этого метода заключается в том, что фактическое отверстие телескопа решеткой сокращается, так как непрозрачные прутья задерживают свет.

При выборе или при конструировании решетки должны быть учтены следующие элементы:

1) дисперсия;
2) поглощение;
3) соотношение яркости между $m$-м дифракционным спектром и срединным изображением, выраженное в величине звезд.

*Дисперсия.* Если $a$ — ширина прозрачного, а $d$ — ширина непрозрачного интервала решетки, $f$ — длина фокусного расстояния зрительной трубы, $D$ — расстояние первого дифракционного изображения от срединного изображения и $\lambda$ — длина волны примененного света (все величины выражены, допустим, в сантиметрах), то

$$D = \frac{f \cdot \lambda}{a + d}.$$

Если на фотографическую пластинку действует свет области длин волн от $\lambda_1$ до $\lambda_2$, то ширина дифракционного изображения выразится уравнением:

$$\frac{f(\lambda_1 - \lambda_2)}{a + d}.$$

Если нам желательно сократить эту ширину, нужно уменьшить выражение

$$\frac{f}{a + d},$$

что означает выбрать величину $a + d$ таким образом, чтобы центральное изображение и первое дифракционное лежали по возможности ближе один к другому, но были раздельно различимы.

Константа решетки должна быть выбрана настолько большой, насколько позволяют это проектируемые зрительной трубой изображения.

*Поглощение* выражается разностью яркостей центрального изображения при пользовании решеткой и того же изображения в отсутствии ее (при одинаковой продолжительности экспозиции), т. е. следующим отношением:

$$B_0 : B\left(\frac{a}{a+d}\right)^2,$$

в котором $B$ означает яркость срединного изображения, когда решетки нет, а $B_0$ — яркость того же изображения при введении ее.

Фактическая потеря света меняется таким образом с квадратом отношения между действительным просветом решетки и ее константой $(a+d)$.

Решетка должна быть сделана возможно более узкой, т. е. настолько узкой, насколько это возможно с учетом прочих требований.

*Распределение яркости.* Если $B_m$ — яркость $m$-го бокового изображения, $B_0$ — яркость первого бокового изображения, то:

$$B_0 : B_m = \left(\frac{am\pi}{a+d}\right)^2 : \sin^2\frac{am\pi}{a+d},$$

или выраженное в величинах звезд равняется

$$2{,}5\log\left[\left(\frac{am\pi}{a+d}\right)^2 : \sin^2\frac{am\pi}{a+d}\right] = 5\left(\log\frac{am\pi}{a+d} - \log\sin\frac{am\pi}{a+d}\right).$$

Таким образом величины звезд, полученные по методу решетки, или их отношение, так же точно, как и поглощение, зависят от отношения, существующего между просветом решетки и ее константами.

Следующая таблица содержит значения величины $\frac{a}{a+d}$, необходимые для установления определенного интервала величины с учетом первого бокового изображения:

| $\frac{a}{a+d}$ | $\frac{d}{a+d}$ | Интервал величины | Поглощение (в величинах звезд) |
|---|---|---|---|
| 0,950 | 0,050 | 6,402 | 0,111 |
| 0,900 | 0,100 | 4,806 | 0,229 |
| 0,850 | 0,150 | 3,848 | 0,353 |
| 0,800 | 0,200 | 3,155 | 0,484 |
| 0,750 | 0,250 | 2,614 | 0,624 |
| 0,700 | 0,300 | 2,171 | 0,774 |
| 0,650 | 0,350 | 1,800 | 0,936 |
| 0,600 | 0,400 | 1,486 | 1,109 |
| 0,550 | 0,450 | 1,214 | 1,298 |
| 0,500 | 0,500 | 0,980 | 1,505 |

В большинстве случаев оказалось приемлемым выбирать значение интервала около трех величин звезд. Если избрать значительно больший интервал, то лишь немногие звезды вызовут дифракционные явления; кроме того в этом случае необходимо очень точное определение отношения

$$\frac{d}{a+d}.$$

Если же избрать значительно меньший интервал величины, то потеря света на поглощение будет очень велика. При пользовании для фотометрирования ряда звезд решеткой с малым интервалом величины источники ошибок увеличиваются, так как необходимы многие «ступени».

Для пояснения изложенных соотношений в нижеследующей таблице указаны данные, касающиеся двух решеток, примененных в Гринвичской обсерватории для исследования распределения яркости околополярных звезд:

| Характеристические данные решетки | Решетка № 1 | Решетка № 2 |
|---|---|---|
| Толщина (диаметр) прутьев | 0,693 *мм* | 1,717 *мм* |
| Константа решетки | 5,000 „ | 7,000 „ |
| Интервал величины | 4,036 велич. | 2,660 велич. |
| Поглощение | 0,325 „ | 0,610 „ |

Фокусное расстояние зрительной трубы, примененной в Гринвиче, равно 6 837 *мм;* фотографически актиничная область длин волн простирается от $\lambda = 4\,100$ до $\lambda = 4\,900$ Å, поэтому серединой области является $\lambda = 4\,500$ Å.

Дисперсия, согласно указанным данным, составляет 0,62 или 0,45 *мм,* ширина первого побочного изображения для области длин волн от 800 Å равна 0,11 или 0,08 *мм.* Без решетки диаметр изображения малой, слабой звезды равен на пластинке приблизительно 0,07 *мм.*

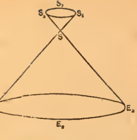
Решетки дают следующие результаты: изображения, сделанные с решеткой № 1, слишком сильно расширены; лучший результат получился бы при большей величине константы решетки. Изображения с решеткой № 2 ясно круглы и сравнимы с изображениями, полученными в середине поля зрения без решетки от слабых звезд [1].

## Параллаксы

Геодезист, который должен определить расстояние от доступной точки до другой, недоступной, например до верхушки колокольни, находящейся по ту сторону реки, через которую нет переправы, решает эту проблему таким образом, что он на берегу, по эту сторону реки, промеряет линию базиса и из обоих концов ее измеряет углы, заключенные между направлением на верхушку колокольни и направлением на другой конец линии основания. Тогда искомая дистанция вычисляется тригонометрически. Проходя вдоль базисной линии, замечают, что верхушка колокольни все время словно меняет свое положение относительно более удаленного фона; это кажущееся смещение значительно,

[1] Chapman u. Melotte, Monthly Not, R. A. S. 1913.

когда рассматриваемый об'ект расположен близко, и мало, когда он отстоит далеко. Вычисление расстояния до звезды является аналогичной проблемой. Поэтому его производят подобным же образом, т. е. наблюдают кажущееся движение звезды относительно заднего плана, заполненного на вид более слабыми и потому предположительно более отдаленными звездами. В течение одного года земля проделывает почти кругообразный путь (планетную орбиту). По прошествии отрезка времени в 6 мес. она находится в конечной точке поперечника этой орбиты, т. е. на расстоянии около 300 млн. *км* от той точки, в которой она была за 6 мес. до этого. Поэтому близко расположенные звезды кажутся нам относительно сместившимися по сравнению с сильно отдаленными звездами.



77. Пояснение параллакса

Если земля находится в $E_1$ (рис. 77), то звезда $S$ видна в направлении $S_1$; если же земля находится в точках $E_2$ или $E_3$, то звезда видна в направлениях $S_2$ или $S_3$. Так как земля движется по своей орбите, то кажется, что звезда описывает на небе аналогичный путь, протяжение которого соответствует проекции земной орбиты на небесную сферу, и центром проекции является звезда. Исходя из радиуса земной орбиты, который нам известен, а также из угла $E_1SE_3$, можно вычислить отрезок $E_1S$ (решив треугольник).

Половина угла $E_1SE_3$, или проекция радиуса земной орбиты на небесной сфере, называется годовым параллаксом звезды.

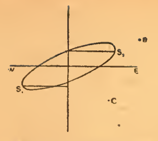
В прежние времена астрономы пытались определять абсолютное расстояние звезд таким путем, что они в соответствии с принятыми в геодезии методами измеряли большие углы у основания треугольника. При этом они не представляли себе, как невероятно велики расстояния, наблюдаемые в мировом пространстве, т. е. как чрезвычайно мал должен быть угол параллакса даже для наиближайших звезд, — угол этот так мал, что наряду с неустранимыми ошибками наблюдений он совершенно исчезает. Осознав это, Гершель пришел к мысли о возможности определения только относительных расстояний звезд путем определения относительных смещений ярких звезд по сравнению с безусловно значительно более отдаленными, слабыми звездами; этот метод применяется и по сей день.

Так как земля движется по планетной орбите, то звезда описывает на небесной сфере эллипс, повидимому соответственный земной орбите. В каждый данный момент звезда кажется смещенной против своего истинного положения на некоторую величину, которая пропорциональна радиусу земной орбиты, помноженному на синус угла между солнцем и звездой. Для пояснения рассмотрим рис. 78.

Звезда $S$ повидимому будет описывать эллипс, аналогичный эклиптике; его смещение в какой-нибудь определенный момент




**78**. Вывод параллакса из сферически в астрономических элементов: *EC* — эклиптика, *p* — полюс иеба, $\odot$ — положение солнца на эклиптике в какой-либо момент; *S*—среднее положение звезды




**79**. Вывод параллакса из фотографических симмков иеба

времени пропорционально $R \cdot \sin S\odot$, где $R$ означает радиус земной орбиты, а $S\odot$ — угол между солнцем и звездой.

Хотя полное смещение $S\odot$ измеримо, но обычно его разлагают на два компонента (а именно, в направлениях прямого восхождения и склонения).

Если обозначим параллакс через $\pi$, причем под параллаксом будем понимать угол, под которым из данной звезды видна главная полуось упомянутого эллипса, а через $f$ — наблюдаемую часть его, то окажется, что

$$f\pi = R \sin S\odot \pi,$$

$$f\pi_\alpha = R \sin S\odot \sin PS\odot \cdot \pi_{\alpha_r}$$

$$\alpha = R\,\mathrm{si} \qquad \sin F \odot \cdot \pi_\alpha$$

$= R \sin$ (прямое восхождение солнца — прямое восхождение звезды). cos склонения солнца $\cdot\, \pi_\alpha$

$$f\pi_\delta = R \sin S\odot \cos PS\odot \cdot \pi_\delta.$$

Компонент $f\pi_\delta$ обычно значительно меньше компонента в направлении прямого восхождения, и потому большей частью величиной его пренебрегают.

Компонент параллакса в направлении прямого восхождения будет иметь наибольшую величину, когда расстояние звезды от солнца составляет 90°, или $6^h$, т. е. когда звезда проходит через меридиан в $6^h\, a \cdot m$ или в $6^h\, p \cdot m$. Смещение положительно утром и отрицательно вечером, поэтому необходимые наблюдения следует делать в это время.

Для определения параллакса какой-либо звезды делают фотографические снимки этой звезды с промежутком в 6 мес., когда звезда стоит почти на 90° восточнее или западнее солнца. В первом случае звезда оказывается в положении $S_1$, во втором — в положении $S_2$ (рис. 79). Смещение из $S_1$ в $S_2$ в направлении прямого восхождения измеряется относительно соседних слабых звезд. На рис. 79 *A*, *B*, *C* — такие сравнительно очень отдаленные

звезды. На первой фотограмме промеряется положение $S_1$ в $x$-направлении (направление прямого восхождения) относительно выбранной для сравнения звезды; на второй фотограмме аналогичным образом промеряется положение $S_2$, и разность $x_1 - x_2$ соответствует (кажущемуся) смещению в направлении прямого восхождения. Это смещение зависит как от параллакса, так и от собственного движения звезды, почему недостаточно двух наблюдений при двух временах; требуется не менее трех наблюдений (при трех временах); большее количество снимков несомненно еще лучше.

После измерения координат и приведения их в общую систему вычисленные из фотографических снимков $x$-координаты звезды, параллакс которой должен быть определен, подставляются в следующую систему уравнений:

$$
\begin{aligned}
f_1\pi + t_1\mu + c &= x_1, \\
f_2\pi + t_2\mu + c &= x_2, \\
f_3\pi + t_3\mu + c &= x_3, \\
\ldots\ldots\ldots\ldots & \quad \text{и т. д.,}
\end{aligned}
$$

в которых $\pi$ означает параллакс звезды, $f$ — наблюденную или вычисленную его часть, $\mu$ — собственное движение звезды, $t$ — время наблюдения, выраженное в годах. Решение этих уравнений при помощи метода наименьших квадратов дает средние величины $\pi$ и $\mu$.

Описанная выше последовательность работы очень проста, но искомая величина настолько мала, что при наблюдении необходима исключительно большая точность. Прежде всего нужно позаботиться о том, чтобы оптические константы телескопа оставались неизменными. Сходственные снимки должны делаться при одинаковом часовом угле, чтобы устранить ошибки, могущие произойти от атмосферной дисперсии и возможной иногда деформации больших линз телескопа. Кроме того установка зрительной трубы должна быть сделана чрезвычайно точно. Для того чтобы элиминировать остатки ошибок, происходящие от упомянутых выше причин и сохраняющиеся, несмотря на все принимаемые меры, следует избирать в качестве звезд для сравнения только звезды приблизительно одинаковой величины и возможно более близкие по окраске.

Ввиду того, что наблюдаемая звезда в отношении сравниваемой кажется очень яркой, ее яркость в изображении должна быть в целях проведения сравнения соответственно уменьшена при помощи какого-либо приспособления, например путем включения нейтрального фильтра (серого клина) или применения надлежащего раздвижного «затвора».

Обычно поступают следующим образом: для ослабления яркости наблюдаемого изображения пользуются вращающимся диском, состоящим из двух частей; обе части его можно повернуть друг около друга таким образом, что остается открытым сектор подходящих размеров, с помощью которого яркость изображения звезды может быть ослаблена на нужную величину. Диск нахо-

дится перед изображением звезды и вращается от электромотора или посредством часового механизма. В результате пластинка на участке, занимаемом изображением звезды, прерывисто освещается сквозь отверстие сектора диска, в то время как слабые звезды, образующие задний план, лежат вне области действия секторного диска и непрерывно освещают пластинку. И наконец необходимо позаботиться о том, чтобы пластинки были равномерно проявлены и высушены, ибо иначе получатся искажения эмульсионного слоя.

При желании получать особенно точные снимки необходимо всегда подходить с известным недоверием к качеству эмульсионного слоя. В целях предотвращения ошибок вследствие искажения слоя Каптейн предложил метод определения параллакса, по которому одна и та же пластинка освещается в различные моменты времени (на протяжении 6 мес.): снимки делаются рано утром, вечером, снова утром или вечером и утром и опять вечером; затем следует проявление. Сравнение второго снимка с первым и третьим ведет к определению параллактического смещения, а сравнение первого снимка с третьим дает собственное движение. Предложенный метод — теоретически безукоризненный, но он вытеснен другим способом, в котором каждый раз берется новая пластинка, так как вполне возможны случаи, когда удачный первый снимок может быть испорчен плохим вторым.

## Промер пластинок

При промере пластинок по методу Каптейна на снимках, полученных утром или вечером, с помощью микроскопического винта микроскопа измеряются разности x-координат (прямых восхождений) звезды, находящейся в поле зрения, и звезды сравниваемой. Эти разности координат $\delta x$ выражаются уравнением нижеследующего вида:

$$ax + by + c = \delta x .$$

После того как разность координат звезды, параллакс которой должен быть определен, исправлена на основании полученных констант, сохраняется некоторый остаток $R$, происшедший от собственного движения ($\mu$) и от параллакса ($\pi$).

Таким образом пластинка Каптейна дает следующее уравнение:

$$f_1\pi + t_1\mu = R_1$$

или

$$f_2\pi + t_2\mu = R_2,$$

в котором $t$ означает промежуток времени между экспозициями, а $f$ — разность между долями величины параллакса (утро — вечер).

Отдельные снимки, сделанные в различное время, должны быть каждый в отдельности промерены с помощью какого-либо измерительного прибора. Для этого пользуются или шкалой, поме-

щенной в фокальной плоскости окуляра микроскопа, причем изображение шкалы совпадает с изображением фотограммы, или же работают (и это часто предпочитается) с точным измерительным винтом, перемещающим микроскоп вдоль пластинки. С помощью микроскопа изображения звезд очень точно (точечно) устанавливаются; смещения микроскопа просчитываются на большом измерительном барабане, имеющем в целях достижения требуемой точности большие интервалы.

Определяемые таким путем параллаксы относительны применительно к звездам, взятым для сравнения. Эти параллаксы можно превратить в абсолютные, введя небольшую поправку, соответствующую средней величине параллакса звезды, служащей для сравнения.

Тщательное исследование собственного движения звезд показывает, что направление этого движения исходит главным образом из одной точки, имеющей прямое восхождение, равное $18^h$, и северное склонение, равное 30°. Путем спектроскопических исследований движения звезд в направлении радиуса визирования обнаружено, что относительно этой точки солнце движется со скоростью 20 *км* в секунду.

Если бы звезды не обладали собственным движением, то их кажущееся движение было бы исключительно параллактическим и потому могло бы служить для измерения их расстояний. Но так как звезды обладают собственным движением, равным или бо́льшим солнечного движения, то параллакс является только приближенной мерой их расстояния. Для звезд, величина которых известна, следует во всяком случае принимать расстояния как «средние». Можно принять, что звезды 10-го класса величины имеют в среднем параллакс в $+0{,}004''$, а звезды 11-го класса — в $+0{,}003''$. Если звезды, взятые для сравнения, принадлежат к 11-му классу величины, то в величину относительного параллакса вводится поправка в $+0'',003$ и полученный таким путем результат рассматривается как абсолютный параллакс.

## Зеркальный телескоп

Когда Ньютон начал сильно сомневаться в разрешимости проблемы изготовления ахроматического об'ектива зрительной трубы, он принялся за конструирование вогнутого зеркала, и ему удалось построить небольшой зеркальный телескоп. Впоследствии Гершель значительно усовершенствовал этот прибор, и тогда последний приобрел большое значение.

Преимущества металлического зеркального телескопа следующие: 1) простота конструкции, 2) полная независимость от цвета.

Недостатки этого инструмента следующие: 1) значительный вес и в связи с этим большая трудность предотвращения деформации (чрезмерного натяжения); 2) чувствительность к температурным колебаниям; 3) ввиду того что точное выполнение сферической поверхности — очень трудная задача, изготовление таких поверхностей под силу только очень искусным работникам.

Лишь после того как удалось достаточно усовершенствовать методы серебрения стеклянных поверхностей, можно было вместо металлических зеркал воспользоваться стеклянными (посеребренная сферическая поверхность, безукоризненная в оптическом отношении). Нанесенный серебряный слой очень тщательно полируется до зеркального глянца; если с течением времени на зеркале образуются пятна, то искусный специалист может его наново высеребрить.

Хотя при простых астрономических наблюдениях положения светил рефрактор в силу его большей устойчивости и более прочного устройства не может быть вытеснен зеркальным телескопом, однако имеются многие области, в которых последний не только очень удобен, но даже превосходит по действию рефрактор; такой областью является спектроскопия звезд.

Огромное значение при решении различных астрофизических задач имеет то обстоятельство, что зеркальный телескоп совершенно свободен от хроматических ошибок. С помощью рефрактора можно фокусировать в одной плоскости только узкую область спектра. Например в 92-сантиметровом об'екте телескопа Ликкской обсерватории фокус линии $H\delta$ отстоит от фокуса линии $D$ на 81 *мм*. Изображение звезды, на которую с помощью щели спектроскопа сделана наводка для света линии $D$, лежало бы для света линии $H\delta$ очень далеко за пределами фокальной плоскости, следствием чего было бы значительное уменьшение интенсивности спектра для этой длины волны. Полученный таким путем спектрофотографический снимок не давал бы правильного представления о распределении света в соответствующем спектре.

Далее, в зеркальном телескопе с большим отверстием потери света на поглощение относительно малы.

В зрительной трубе, состоящей из двух линз, бесполезно пропадает свет, отражающийся от четырех поверхностей. Количество и характер потерь на поглощение зависит от сорта примененного стекла, но в ультрафиолетовой области поглощение всегда наибольшее. По этой причине, пользуясь обыкновенным фотографическим об'ективом, невозможно изобразить большую часть ультрафиолетовой области спектра звезды, в то время как с помощью зеркального телескопа очень легко фотографически запечатлеть даже самые короткие длины волн из тех, что в состоянии пройти через атмосферу.

Если допустить, что фокус зеркального телескопа Ньютона достигает 50% химически активных лучей (приблизительно $\lambda = 4\,300$ Å), то при малых относительных отверстиях рефрактор оказывается более пригодным. С увеличением относительного отверстия из-за возрастания толщины линз сильно увеличивается поглощение, вследствие чего превосходство рефрактора перед зеркальным телескопом постепенно исчезает.

Нижепомещаемая таблица позволяет сравнить при различных отверстиях рефракторы и зеркальные телескопы в отношении их способности улавливать химически активные лучи [1].

[1] Hale, Astrophys. Iournal V, 119.

| Отверстие | Способность улавливать химически активные лучи | |
|---|---|---|
| | рефрактор | зеркальный телескоп |
| 11 дюйм. ( 280 *мм*) . | 5,41 | 3,76 |
| 22 „ ( 560 „ ) . | 18,19 | 15,05 |
| 33 „ ( 840 „ ) . | 34,57 | 33,89 |
| 44 „ (1 120 „ ) . | 51,43 | 60,21 |
| 55 „ (1 400 „ ) . | 68,60 | 94,08 |
| 66 „ (1 680 „ ) . | 81,85 | 135,48 |

Из этой таблицы видно, что при отверстии в 840 *мм* зеркальный телескоп работает так же хорошо, как и рефрактор, а при отверстиях от 1 500 до 2 500 *мм* в отношении способности улавливать химически активные лучи он превосходит всякий рефрактор.

Зеркальные телескопы могут обладать сравнительно большим относительным отверстием; наиболее употребительные в настоящее время относительные отверстия колеблются около 1 : 4,5. Если мы учтем это обстоятельство и сопоставим его с тем, что относительное отверстие фотографического рефрактора в среднем составляет 1 : 10, будет понятно, насколько больше полезное действие зеркального телескопа. Из этого следует, что зеркальный телескоп должен быть гораздо удобнее для фотографического фиксирования слабых или трудно улавливаемых об'ектов.

Приведенные выше данные сравнения относительного полезного действия рефракторов и зеркальных телескопов относятся к ньютоновскому устройству зеркального телескопа, в котором имеют место два отражения. Неустранимых при втором отражении потерь можно избегнуть, помещая фотографическую пластинку непосредственно в фокальную плоскость большого зеркала, — такая установка имеется в 750-миллиметровом зеркальном телескопе Гринвичской обсерватории.

В этом случае совершенно так же, как и в астрофотографическом рефракторе, наводка делается с помощью направляющего (ориентирного) телескопа, укрепленного на тубусе зеркала. Недостаток такой конструкции заключается в том, что во время продолжительной экспозиции сотрясение большого зеркала может повести к нерезкости фотографического изображения. Эту трудность старались преодолеть особо тщательным укреплением зеркала, но ввиду того, что зеркало также чрезвычайно чувствительно к напряжениям, американские астрономы избрали излагаемые ниже методы наводки изображения, обладающие несомненными преимуществами при оперировании с большими зеркалами, когда желательно максимально использовать их полезное действие. Включая плоское зеркало на пути пучка лучей, отклоняют свет в фокус, лежащий вбок от тубуса, и в этот фокус помещают фотографическую пластинку. Кассета пластинки монтирована на крестообразных салазках, которые можно передвигать в направ-

лениях прямого восхождения и склонения. Отграниченная часть поля зрения или изображения зеркального телескопа (за пределами фотографической пластинки) наблюдается с помощью окуляра, укрепленного на кассете пластинки. Выбирается какая-нибудь подходящая звезда в качестве ведущей (отправной), на нее наводится скрещение нитей, и кассета фиксируется зажимами. Во время экспозиции скрещение нитей все время удерживается на ведущей звезде. Это достигается тем, что кассета передвигается применительно к каждому отдельному случаю на небольшие отрезки. Таким путем можно компенсировать сотрясения зеркала.

При фотографировании очень слабых звезд необходимы очень продолжительные экспозиции. Фотографирование туманностей и слабых звезд не представляет труда, если наводка сделана очень тщательно. Если же об'ект находится в очень быстром движении, как например комета, небольшая планета или один из слабо заметных сателлитов Юпитера, то тонкие следы пути об'екта всегда будут мешать. В таких случаях необходимо прибегнуть к тому, чтобы об'ект сделать по отношению к пластинке «неподвижным», а остальные звезды двигались относительно него. При этом нецелесобразно наводить на об'ект, так как он очень слабо заметен. Поэтому вычисляют данные, определяющие его движение (в смысле направления и величиины), и наводят таким образом, чтобы инструмент был соответственно «предпослан», для чего пользуются окулярным микрометром, имеющимся при окуляре направляющей зрительной трубы. Если все время следить, чтобы «направляющая звезда» не сходила с движущегося скрещения нитей окулярного микрометра, то фотографическая пластинка будет в покое относительно собственного об'екта; последний изобразится несмещенно (неискаженно), а следы остальных звезд будут переданы маленькими черточками (хвостиками).

Движение планет было использовано для открытия новых малых планет. Этот интересный метод предложен Максом Вольфом из Гайдельберга. Небольшую планету на одном снимке трудно отличить от слабой звезды, если же сделать два снимка одного и того же участка неба непосредственно следующие один за другим (второй снимок делается вскоре же после первого), то на втором снимке положение планеты будет иным по сравнению с первым. Если оба снимка одновременно рассматривать в стереоскоп, то заметно смещение планеты [ее (стереоскопический) параллакс] в виде пространственного различия глубины по отношению к заднему плану: кажется, что планета висит впереди неподвижных звезд.

## Фотогелиограф

Если рассматривать солнце в зрительную трубу, то оказывается, что оно неравномерно ярко и на его поверхности имеется много более темных точек и пятен. Систематическое, внимательное и терпеливое изучение их привело к распознанию вращения солнца вокруг собственной оси и к выяснению его физических свойств. До введения в астрономию фотографических методов наблюде-

ние положения солнечных пятен происходило следующим образом: если направить телескоп на солнце, то в его фокальной плоскости появляется изображение солнца. С помощью более слабой линзы (например соответствующего окуляра) это изображение увеличивается и проектируется на белый экран. В фокальной плоскости телескопа натянуты в виде креста две нити таким образом, что, взаимно пересекаясь, они образуют угол в 90°, а плоскость, в которой расположены нити, наклонена под углом в 45° к плоскости суточного движения солнца. Если инструмент хорошо закреплен, то на экране появится изображение солнечного диска вместе с изображением скрещенных нитей. Если заметить шесть моментов времени, в которые край солнечного диска или его центр совмещаются с нитями, то путем простого вычисления можно определить положение пятна относительно центра солнечного диска.

Устройство фотогелиографа тоже основано на приведенном выше принципе проектирования, но в нем увеличенное изображение моментально запечатлевается на светочувствительной пластинке. Фотогелиограф, применяемый в Гринвиче, состоит из зрительной трубы с отверстием в 100 *мм* и фокусным расстоянием, равным 1 500 *мм* дающим в фокальной плоскости изображение солнца диаметром в 15 *мм;* в фокальной плоскости натянут крест нитей. С помощью увеличивающей системы линз на пластинку проектируется изображение диаметром около 200 *мм*. Для освещения пользуются щелевым затвором, узкая щель которого быстро проскальзывает перед первичным изображением.

Скрещение нитей, одновременно тоже изображающееся на фотографической пластинке, служит для ориентирования изображения в направлении с севера на юг. Угол наклона нитей креста к линии север — юг определяется таким образом: при остановленном часовом механизме на одной и той же пластинке делается два снимка, причем промежуток времени между этими снимками выбирается с таким расчетом, чтобы изображения частично перекрывали друг друга. Линия, соединяющая точки пересечения контуров, после введения поправки на солнечное движение в направлении склонения представляет собой линию, идущую по направлению с севера на юг.

Фотограмма промеряется с помощью соответствующе сконструированного микрометрического измерительного прибора, позволяющего непосредственно промерять угол, определяющий положение солнечного пятна, а также его расстояние от центра солнечного диска.

В менее сильных микроскопах, применяемых для этих целей, пользуются подходящим растром, делящим поверхность на очень малые участки; каждый такой участок отвечает приблизительно одной полумиллионной части солнечного диска; таким путем можно учесть поверхность солнечного пятна.

Путем таких измерений определяется как положение (длина и ширина), так и величина солнечного пятна.

Швабе в 1843 г. установил, что величина поверхности, занимаемой пятнами, имеет периодический характер. В определенные

моменты времени солнце бывает почти свободно от пятен; затем начинает появляться много пятен, пока число их не доходит до максимума. Потом пятнообразование снова, скачками, ослабляется и доходит до минимума. На основании многочисленных наблюдений можно считать установленным, что средняя продолжительность такого периода равна $11^1/_9$ года.

Затем замечено следующее своеобразное явление. Солнечные пятна начинают возникать в высших широтах, именно около 35° и выше. По мере истечения периода зона солнечных пятен перемещается по направлению к экватору, причем полоса наибольшего пятнообразования приходится приблизительно на 15°. В конце концов период заканчивается вблизи 6° широты.

Если наблюдать движение солнечных пятен на поверхности диска, можно найти отправные точки для определения периода вращения солнца и для установления направления его оси. Так как некоторые пятна на протяжении двух или нескольких оборотов солнца остаются без перемен, можно было бы думать, что возможно быстро и точно вычислить время его вращения. Однако это допущение неприемлемо, так как разные пятна имеют неодинаковые периоды. Солнце не является абсолютно твердым телом и не имеет постоянного периода вращения; он меняется, в особенности в наружных слоях, с широтой. Ввиду этого для экватора период продолжается несколько меньше 25 дней, а для 50° широты период длится около 27½ дней.

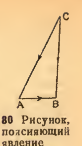
На хороших фотограммах можно по соседству с солнечными пятнами заметить светлые места (световые прожилки) — так называемые солнечные факелы. Лучше всего они различимы по краю солнечного диска, где контраст по сравнению с фотосферой повышен поглощением солнечной атмосферы.

Известно еще и другое явление, именно грануляция солнечной поверхности или, вернее, фотосферы, имеющая на фотограммах с достаточным разрешением вид мелкой зернистости. Эта грануляция зависит от местных конвекционных токов в более глубоких слоях атмосферы; светлые участки поверхности соответствуют вершинам подымающегося газового столба, а темные — более холодному, оседающему газу.

### Фотографирование следов движения звезд в целях определения констант аберрации, а также вычисления изменения широт (колебаний высоты стояния полюса)

Когда во время дождя (предполагается, что дождевые капли падают отвесно) мы движемся в каком-либо направлении, то всегда ощущаем, что дождевые капли ударяют в лицо в определенном направлении. Кажущееся направление движения дождевых капель есть слагаемая направления их соответственного движения с направлением движения наблюдающего это явление лица. Поэтому, если в определенный промежуток времени, в течение которого наблюдатель перемещается из *A* в *B*, дождь падает по направлению из *C* в *B*, то кажется, что он падает в направлении линии *CA* (рис. 80).

Со светом получается аналогичное явление. Свет обладает очень большой, но определенной скоростью, а земля на своем пути вокруг солнца — относительно малой скоростью. Отсюда, если иметь в виду направления на различные светила, вытекает отклонение света, аналогичное только что описанному. В результате получается небольшое кажущееся смещение светила по сравнению с точкой, относительно которой земля движется. Это смещение будет наибольшим, когда направление на светило перпендикулярно к направлению движения земли; оно уменьшается с синусом угла, заключенного между обоими указанными направлениями.



**80** **Рисунок, поясняющий явление аберрации**

Ввиду того, что вращаясь вокруг солнца, земля описывает круг (эллипс), кажется, что каждая звезда проделывает небольшой путь, соответствующий земному пути. Этот путь, являющийся проекцией земного пути, для звезды, находящейся в полюсе эклиптики, будет кругом, для звезды, находящейся в плоскости эклиптики, — линией, а для звезд, лежащих в промежуточных широтах, — эллипсом. Угол, опирающийся на большую полуось эллипса (со звездой в вершине), называется константой аберрации и приблизительно равняется 20,5″. В продольном направлении смещение будет наибольшим, когда звезда находится на прямой, соединяющей солнце и землю, или в полдень и в полночь при прохождении меридиана. В поперечном направлении смещение наибольшее, когда звезда проходит через меридиан за 6 час. до полудня или через 6 час. после него; вечером оно положительное, утром — отрицательное.

Выше мы установили, что звезда, находящаяся на измеримом расстоянии, должна вследствие параллакса описывать на небе эллипс. В этом случае наибольшее смещение в продольном направлении будет, когда звезда проходит через меридиан на 6 час. раньше или позже солнца; в поперечном направлении наибольшее смещение будет при прохождении звезды через меридиан в полдень или в полночь. Эти соотношения прямо противоположны соотношениям, существующим в аберрационном эллипсе. Брадлей в 1725 г. пытался определить параллакс γ Дракона путем систематических наблюдений его склонения в течение всего года. При этом он действительно констатировал движение звезды, однако вовсе не параллактическое, но которое он правильно определил как зависящее от аберрации света.

Так как с помощью ватерпаса или ртутного уровня (ртутного зеркала) можно очень точно определить направление на зенит, то константа аберрации очень точно определяется из наблюдений зенитных расстояний отдельных звезд.

Для точных измерений этого рода Биан Куксон в 1901 г. предложил плавающий зенитный телескоп[1]. Так как этот инструмент очень успешно применяется, помещаем его краткое описание.

[1] Month. not. R. A. S, 1901, March.

Прибор состоит из трех главных составных частей: сосуда (ванны) с ртутью, поплавка и зрительной трубы. Ванна и поплавок — это неглубокие кольцеобразные сосуды; поплавок и ванна концентричны между собой; кольцеобразный, круглый промежуток между ними составляет около 1,25 *мм*. После того как в ванну налита ртуть, поплавок занимает определенное положение равновесия.

Зрительная труба проходит через центральную ось упомянутого кольца, а цапфами она покоится на V-образных вилках, опирающихся на поплавок. Ванна монтирована неподвижно, а поплавок — подвижно, поэтому его можно устанавливать на определенный азимут. Ванна покоится на 3 парах железных лап на высоте около 1,4 *м* от пола. Внутренний диаметр ванны имеет такие размеры, что зрительной трубе можно придать максимальное зенитное расстояние в 45°. Зрительная труба снабжена об'ективом с отверстием в 16 *см* и фокусным расстоянием около 1 625 *см*, поэтому 1 *мм* в изображении отвечает полю зрения в 750 *мм*.

Описанным инструментом пользуются для фотографирования звездных путей, описываемых поперек меридиана; так как две определенные точки поплавка точно устанавливаются против двух неподвижных точек ванны, поплавок можно поворачивать точно на 180°. Отсюда следует, что линия пересечения плоскости меридиана с плоскостью фотографической пластинки до и после такого вращения одна и та же, так как ось вращения всего прибора стоит вертикально.

Меридиан отмечается на фотографической пластинке тем, что одновременно со снимком звезды фотографируется проволочка, натянутая в нижней части зрительной трубы по направлению с севера на юг непосредственно перед пластинкой.

Если изображению звезды, лежащей близко к зениту, дать пройти по фотографической пластинке, пока путь ее почти достигнет меридиана, затем повернуть зрительную трубу на 180° и дать той же самой звезде после прохождения меридиана снова оставить след на пластинке, то после проявления на пластинке окажутся два следа от звезды — оба по одну сторону плоскости меридиана, отделенные расстоянием, соответствующим удвоенному зенитному расстоянию звезды. Для нахождения константы аберрации можно было бы наблюдать какую-нибудь подходящую звезду в отношении изменения ее зенитного расстояния в то время, когда она описывает свой аберрационный эллипс.

Однако при определении аберрации встречается та трудность, что в последнее время обнаружено движение земли, называемое и з м е н е н и е м ш и р о т (колебанием высоты стояния полюса). Перемещение земной оси в мировом пространстве — нутация — известно уже давно; изменение широт (колебание высоты стояния полюса) получается в результате перемещения земной оси внутри самого земного шара, в результате чего широта для данной точки на земной поверхности меняется. Движение полюса иррегулярно и имеет два периода — один продолжительностью в 12, а второй — в 14 мес. Оба периода накладываются друг на друга таким образом, что изменение широт делается то больше, то меньше, причем однако наивысшая его величина едва превышает половину дуговой

секунды. Приведенное обстоятельство выражается проще следующим образом: полюс земли описывает сложную спиральную линию на плоскости, которую мы представляем себе перпендикулярной к среднему положению земной оси.

Если наблюдать только одну звезду, то величины аберрации и годового изменения широт (колебания высоты стояния полюса) оказываются неразрывно связанными. Теперь вспомним, что аберрация с часа на час меняется, в то время как широта остается неизменной в течение всей ночи. Теперь, если выбрать две звезды, которые проходят через меридиан одна за другой с промежутком в 6 час., причем первая проходит через меридиан около $6^h\ p{\cdot}m.$, то ее зенитное расстояние будет обусловлено как изменением широты, так и сильным аберрационным смещением; зенитное расстояние второй звезды, проходящей через меридиан в полночь, будет всегда отягощено только изменением широты, но не аберрацией. Обе величины можно отделить друг от друга, наблюдая в течение целого года циклически 4 звезды с 6-часовым интервалом. На основании этих наблюдений можно вывести ряд уравнений, из которых могут быть вычислены как константа аберрации, так и изменение широт.

До сих пор мы занимались только звездами, расположенными вблизи зенита. Это ограничение сопряжено с неприятным недостатком в том отношении, что достаточное число подходящих для наших целей звезд должно лежать очень близко от зенита, отчего промеряемые на пластинке расстояния становятся довольно большими — до 2° и больше. Искомые же нами величины не превышают доли дуговой секунды. Так как принципиально невыгодно определять или, вернее, выводить очень малые величины из разности довольно значительных величин, которые сами подвержены влиянию различных источников ошибок, то первые наблюдения, производившиеся с помощью только что описанного зенитного телескопа, при которых пользовались только очень близко расположенными к зениту звездами, оказались мало интересными для преследуемых этими наблюдениями целей.

На основе этих опытных данных выработался (когда описанный инструмент был установлен в Гринвиче) другой метод, вскоре получивший всеобщее распространение. Это — метод наблюдений звездных пар по Талькотту.

Согласно этому методу, одиночную близкую к зениту звезду заменяют двумя звездами, расположенными на одинаковом расстоянии к северу и к югу от зенита. Пара выбирается с таким расчетом, чтобы прямое восхождение обеих звезд разнилось на несколько минут и чтобы таким образом хватало времени для поворота и установки зрительной трубы. Трубу, не меняя зенитного положения, поворачивают на поплавке на 180°; тогда вторая звезда оставляет на пластинке свой след. Оба следа от звезд на пластинке взаимно параллельны; они пересекают линию меридиана и отделены друг от друга расстоянием, соответствующим среднему алгебраическому зенитных расстояний обеих звезд.

Наблюдения можно конечно уточнить, взяв вместо одной пары целый ряд таких звездных пар; при этом не довольствуются обычно

достаточным для практических целей количеством в 4 звездных пары, а промеряют гораздо более многочисленный материал наблюдений. Последний состоит из 16 групп звезд, каждая группа— из 4—5 звездных пар с разницей прямого восхождения до 1 часа. Каждая отдельная группа фотографируется на одной пластинке. Фотографирование групп делается циклически, по возможности в 6 час. утра и в 6 час. вечера в целях элементирования ошибок в расположении звезд.

Промер фотографических пластинок чрезвычайно прост. Звездные пары выбираются таким образом, чтобы их средние зенитные расстояния были малы, а подлежащая промеру величина (измеренная между двумя взаимно параллельными следами от звезд) не превышала 7 *мм*, или 14 дуговых минут.

Измерительный прибор, которым пользуются для промера пластинки, имеет следующее устройство. Пластинка лежит на салазках, подвижных в перпендикулярном направлении. На прочном держателе укреплено два микроскопа, которые могут совместно передвигаться в горизонтальном направлении. Левый микроскоп наводится на фотографическую пластинку, а с помощью правого микроскопа рассматривают шкалу; таким образом каждый участок на пластинке до известной степени проектируется на эту шкалу. Измерение зенитных расстояний происходит следующим образом: левый микроскоп наводится на один из следов звезды, с помощью второго микроскопа прочитывается показание шкалы, затем наводят левый микроскоп на второй след звезды и снова прочитывают показания в правом микроскопе (промер делается с помощью окулярного микроскопа с ниточной нарезкой).

Дальнейшей обработки данных промера, равно как и составления решения получающихся нормальных уравнений, мы касаться не будем и только сообщим результаты семилетнего ряда наблюдений с 1911 по 1919 гг. Вытекающая из этих наблюдений поправка для константы аберрации составляет:

$$-0{,}025'' \pm 0{,}009''.$$

Результаты измерений изменения широт, или, иначе, колебаний высоты стояния полюса (для того же периода наблюдения), собраны в нижеследующей таблице (см. табл. на стр. 203). Они же в виде диаграммы изображены на рис. 81.

По результатам измерений можно заключить, что плавающий зенитный телескоп позволяет хорошо определять колебание высоты стояния полюса. Далее можно установить, что в результате многочисленных наблюдений, сделанных с этим инструментом, константа аберрации определяется с большой точностью.

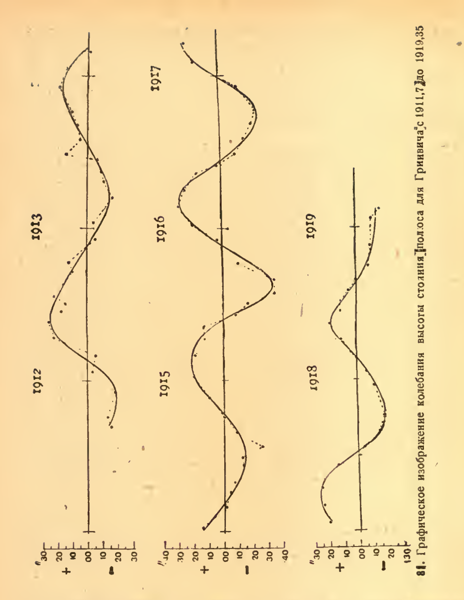
## Спектральный анализ и астрофизика

Ньютон проделал следующий классический эксперимент. Он пропустил пучок лучей сначала через круглое отверстие в оконной ставне; затем этот пучок лучей проходил через стеклянную призму и в конце концов падал на экран в затемненном помещении. Таким путем был получен спектр, т. е. некоторая совершенно

**Изменение широт (колебания высоты стояния полюса) для Гринвича 1911, 7—1919,1**

| Дата | Колебание высоты стояния полюса | Дата | Колебание высоты стояния полюса |
|---|---|---|---|
| 1911 70 | —0,140″ | 1915 44 | —0,083″ |
| 77 | —0,116″ | 51 | —0,142″ |
| 94 | —0,207″ | 58 | —0,336″ |
| 1912 06 | —0,023″ | 66 | —0,337″ |
| 18 | —0,070″ | 77 | —0,089″ |
| 27 | +0,227″ | 91 | +0,012″ |
| 37 | +0,257″ | 1916 04 | +0,211″ |
| 44 | +0,175″ | 17 | +0,270″ |
| 48 | +0,154″ | 27 | +0,237″ |
| 54 | +0,220″ | 37 | +0,170″ |
| 68 | +0,104″ | 42 | +0,059″ |
| 76 | +0,126″ | 50 | —0,106″ |
| 94 | —0,062″ | 58 | —0,157″ |
| 1913 03 | —0,054″ | 69 | —0,201″ |
| 20 | —0,191″ | 77 | —0,247″ |
| 30 | —0,109″ | 92 | —0,130″ |
| 36 | —0,094″ | 1917 07 | +0,178″ |
| 45 | —0,063″ | 18 | +0,222″ |
| 49 | +0,122″ | 29 | +0,244″ |
| 58 | +0,044″ | 35 | +0,233″ |
| 67 | +0,058″ | 44 | +0,130″ |
| 76 | +0,116″ | 50 | —0,023″ |
| 92 | +0,194″ | 54 | —0,035″ |
| 1914 04 | +0,142″ | 66 | —0,149″ |
| 17 | —0,024″ | 76 | —0,184″ |
| 29 | —0,049″ | 94 | —0,155″ |
| 35 | —0,077″ | 1918 06 | —0,054″ |
| 45 | —0,138″ | 19 | +0,068″ |
| 49 | —0,132″ | 27 | +0,102″ |
| 57 | —0,264″ | 36 | +0,191″ |
| 65 | —0,091″ | 43 | +0,099″ |
| 74 | —0,008″ | 50 | +0,105″ |
| 91 | +0,109″ | 57 | +0,058″ |
| 1915 06 | +0,234″ | 66 | +0,012″ |
| 17 | +0,191″ | 74 | —0,071″ |
| 27 | +0,119″ | 90 | —0,084″ |
| 35 | +0,114″ | 1919 60 | —0,106″ |

определенная последовательность различно окрашенных изображений отверстия в ставне. Эти неодинаково окрашенные изображения рисуются в различных местах экрана, так как окрашенные лучи обладают различным преломлением. Спектр, полученный Ньютоном, был очень не чист по той причине, что смежные изображения налагались одно на другое. Легко удостовериться, что достаточно чистый спектр получается, если отверстия в ставне заменить узкой щелью, перпендикулярной к продольному направлению спектра. Волластон в 1802 г. получил такой спектр случайно; он заметил, что в определенных местах спектра име-




81. Графическое изображение колебания высоты столия полюса для Гринвича с 1911,7 до 1919,35

ются черные линии, которыми он однако не стал повидимому дальше заниматься.

В дальнейшем Фраунгофер построил прибор, предназначенный для изучения спектра. Вместо того чтобы дать лучам света прямо падать на призму, он включил между щелью и призмой собирательную линзу и таким путем получил на экране изображение щели, но в виде красивой, резко очерченной спектральной ленты, в которой можно различить черные линии. Изучая эти линии, названные по его имени **фраунгоферовыми линиями**, он установил, что в солнечном спектре они занимают совершенно определенные места, и сам определил около 700 таких

линий. Восемь наиболее заметных линий обозначены им заглавными буквами алфавита, а именно начиная с $A$ в красной и кончая буквой $H$ в фиолетовой области спектра.

Фраунгофер изобрел и приготовил также первую дифракционную решетку, с помощью которой он определил длины волн главных линий, но физический смысл линий, т. е. их происхождение, остался ему неизвестным. Только Г. Киргоффу удалось в 1859 г. выяснить происхождение фраунгоферовых линий. В том же году он опубликовал названные его именем законы, приводимые нами ниже:

1) раскаленное твердое тело дает (испускает) сплошной спектр;
2) раскаленный газ испускает линейчатый спектр, т. е. спектр, состоящей из изолированных (отдельных) ярких линий;
3) если светящееся твердое тело окружено светящимся газом с более низкой температурой, то образуется сплошной спектр с темными линиями.

Киргофф показал, что светящийся газ способен поглощать те самые длины волн, которые он испускает, и что «для лучей той же самой длины волн при той же температуре отношение способности испускания к способности поглощения одинаково для всех тел (представляет собою константу)».

Когда температура газа такова, что его способность испускания превышает способность испускания твердого тела, то в сплошном ярком спектре появляются более яркие линии. Когда способность испускания газа меньше способности испускания твердого тела, то в сплошном спектре появляются темные линии; такой спектр называется спектром поглощения.
Первый эффект дают некоторые звезды, а последний — солнце. Таким образом черные линии в спектре солнца становятся легко понятными.

Внутреннее ядро солнца чрезвычайно горячо и находится под таким давлением, что подобно твердому телу дает сплошной спектр. Это ядро окружено слоем раскаленных, но более холодных различных газов, действующих в некотором роде наподобие фильтра и поглощающих из сплошного спектра солнца те лучи, которые сами испускают. Эту оболочку называют обращающим слоем, так как в результате поглощения на местах светлых линий спектра испускания ядра появляются черные линии. Таким образом фраунгоферовы линии служат ключом к определению химического состава солнца: присутствие на солнце какого-нибудь определенного элемента доказывается тем, что его характерные линии совпадают с линиями поглощения солнечного спектра.

Спектры испускания элементов могут быть прямо сравнены с солнечным спектром: если оба спектра наложить друг на друга, то очень легко установить совпадение определенных линий. Ввиду того, что этот метод не всегда просто осуществим, обычно предпочитают определять абсолютную величину длин волн линий элементов и затем уже сравнивать с абсолютной величиной длин волн солнечного спектра.

С этой целью Ангстрэм в 1868 г. опубликовал таблицу длин волн нормального солнечного спектра, охватывающую визуально воспринимаемую область от *A* до *H*. В дальнейшем эта таблица была вытеснена фотографическими таблицами солнечного спектра. Роуланда, простирающимися до естественной границы поглощения атмосферы.

## Спектроскоп

Волновая теория света принимает, что свет основан на поперечных колебаниях некоторой, все проникающей среды — эфира. Эти колебания (волны) подобны колебаниям, возникающим в безветренную погоду на поверхности пруда, если бросить в воду камень. Все световые волны — какой бы длины они ни были — распространяются в пустоте с одинаковой скоростью; когда же они вступают в более плотную среду, скорость их уменьшается, при этом у более коротких длин волн непропорционально сильнее, чем у более длинных. Этим обстоятельством об'ясняются явления преломления и рассеивания света.

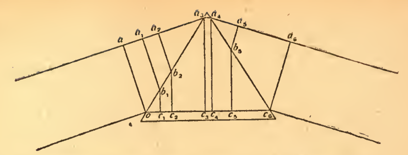
Свет, испускаемый в определенный момент какой-либо светящейся точкой, покидает ее, находясь в определенной фазе, затем распространяется во всех направлениях и в следующий момент времени, если не имела места интерференция, находится во всех точках некоторой шаровой поверхности в той же фазе. Поверхность, пересекающая все волны одинаковой фазы, называется поверхностью волны (фронтом волны). Экспериментальный материал физической оптики показывает, что направление распространения света в каждый данный момент перпендикулярно к фронту волны.

## Призма спектроскопа

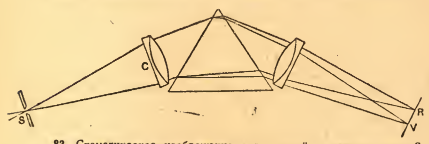
Пучок лучей света в определенный момент времени, изображаемый фронтом волны $ac$ (рис. 82), в точке $c$ начинает проникать в более плотную среду призмы.

Ввиду уменьшенной скорости в более плотной среде свет распространяется от $c$ до $c_1$, в то время как в менее плотной среде за то же время он распространится от $a$ до $a_1$. В результате этого нижняя часть фронта волны придет в положение $b_1c_1$. Следующие части фронта волны будут $a_2b_2c_2$, $a_3c_3$. Когда свет выходит у $a_4$ из призмы, он распространяется здесь быстрее, чем свет в $c_4$, где он задерживается. В конце концов фронт волны переходит в положение $a_6c_6$.

Величина изменения направления между вступающим и выходящим фронтом волны зависит от соотношения скоростей света в обеих средах. Так как это соотношение скоростей для фиолетовых (коротких) длин волн, сильнее задерживаемых, больше, чем для красных (длинных) длин волн, то отсюда следует, что пучок лучей света, содержащий лучи обеих длин волн, будет «расщеплен» таким образом, что фиолетовые лучи отклонятся сильнее красных.




**82.** Путь параллельного пучка лучей света в призме (главное сечение)




**83.** Схематическое изображение хода лучей в спектроскопе: *S* — щель; *C* — коллиматорный об'ектив

Это явление называется р е ф р а к ц и е й или преломлением; изменение направления между вступающими и выходящими лучами называется д е в и а ц и е й (отклонением), а разность направлений различно окрашенных лучей — д и с п е р с и е й.

Спектроскоп Фраунгофера состоял из щели, собирательной линзы, призмы и наблюдательной трубы. Современный призменный спектроскоп в принципе устроен так же.

Спектр — это последовательный ряд изображений щели *S* (рис. 83); каждое изображение имеет цвет другой длины волны; чистота спектра и резкость фраунгоферовых линий зависят от ширины и формы щели. Щель делается из металла, края ее долотообразно скошены и заканчиваются тонким острым ребром. При надлежащей конструкции щели предусматривается возможность изменения по желанию ее ширины.

Пучок лучей света, падающий на призму, должен состоять из параллельных лучей. Это достигается тем, что в непосредственной близости от призмы устанавливается коллиматорный об'ектив *C*, а щель помещается в фокальной плоскости этой линзы (рис. 83).

Пучок лучей света, выходящий из призмы, воспринимается второй линзой и собирается в ее фокальной плоскости. Получающееся изображение рассматривается сквозь окуляр или запечатлевается на фотографической пластинке в *RV*, где *R* означает красный, а *V* — фиолетовый конец спектра.

Призменный спектроскоп после юстировки должен удовлетворять следующим условиям: 1) коллиматорный об'ектив должен посылать на призму п а р а л л е л ь н ы й п у ч о к л у ч е й;

2) оптические оси коллиматорного об'ектива и об'ектива камеры должны лежать в плоскости главного сечения призмы; 3) щель должна быть параллельна преломляющему ребру призмы.

Можно легко доказать, что угол отклонения между направлением вступающего и выходящего пучков лучей света для определенного цвета будет минимальным, когда угол падения равен углу, под которым пучок выходит, и главный луч пучка лежит в плоскости главного сечения, т. е. в плоскости, перпендикулярной к преломляющему ребру призмы. Если вступающий в призму пучок сильно сходящийся или сильно расходящийся, то резкость спектра вследствие естественно возникающей аберрации несколько уменьшена. О параллельности пучка света, выходящего из коллиматорного об'ектива, можно судить, используя астигматизм пучка, обусловленный призмой. Если щель не лежит в фокусе коллиматорного об'ектива, то при почти сомкнутой щели вдоль спектра (т. е. горизонтально) видны так называемые «пылевые линии», обусловленные пылью на краях щели. Изображения этих пылинок не могут быть фокусированы одновременно со спектральными линиями, т. е. не могут быть резко изображены, так как вследствие астигматизма они всегда должны лежать несколько впереди или позади плоскости изображения вертикальной щели. Путем ряда проб коллиматор правильно фокусируется, и камера точно устанавливается; тогда первое условие (1) выполнено.

При выполнении первого условия можно заметить следующее: если щель имеет значительную длину, то спектральные линии не прямы, а искривлены. Это об'ясняется повидимому тем, что минимум отклонения претерпевают только те лучи, которые проходят в плоскости главного сечения, и что в этой плоскости проходят только лучи, выходящие из середины щели. Боковые лучи слегка наклонны и вследствие этого они сильнее отклоняются. Отклонение будет тем большим, чем больше расстояние места выхода лучей от середины щели. Спектральные линии вогнуты в направлении фиолетового конца спектра. Второе условие (2) можно считать выполненным в том случае, если касательные к вершине изогнутых спектральных линий перпендикулярны к продольному направлению спектральной ленты.

Если щель наклонна к преломляющему ребру призмы, то и спектральные линии наклонны к продольному направлению спектра. Щель должна стоять так, чтобы спектральные линии имели вертикальное положение.

Хотя по спектрограммам, сделанным с помощью щелевого спектроскопа, можно изучать физические свойства звезд, однако этот прибор главным образом применяется для определения движения звезд в направлении визионного радиуса; для этих определений пользуются принципом Допплера-Физо.

Когда звезда приближается к земле со скоростью $v$, то каждая длина волны света, попадающего на землю, как бы укорачивается. Если $c$ — скорость света, $\lambda$ — действительная длина волны, $\lambda_1$ — кажущаяся длина волны, то

$$\lambda - \lambda_1 = \frac{v}{c}\,\lambda.$$

На эту величину смещаются спектральные линии. Если линии кажутся смещенными по направлению к фиолетовому концу, следовательно звезда приближается к нам; если смещение направлено к красному концу, то, наоборот, звезда удаляется.

Смещение спектральной линии известной нам длины волны в результате движения звезды легко вычислить следующим образом. Скорость $c$ света равна 300 000 *км* в секунду, длина волны $\lambda$, например линии $H_\beta$ водорода, равна

$$\frac{4861}{10000000}\ мм;$$

кажущаяся длина волны $\lambda_1$ этой линии равнялась

$$\frac{4860}{10000000}\ мм;$$

Поэтому

$$v = c\,\frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda} = 300\,000 \cdot \frac{1}{4861}\ км/сек. = 62\ км/сек.$$

Для того чтобы получить возможность промерить изменения или, вернее, смещения длин волн, нужно спектр звезды сравнить со спектром какого-нибудь земного источника света. В большинстве случаев в качестве элементов для сравнения пользуются железом или титаном, используя их дуговой или искровой спектр. Названные элементы особенно пригодны для указанной цели потому, что их спектры содержат очень много особенно резких линий, очень удобных для промера. Сравниваемые спектры помещают над спектром звезды и под ним так, чтобы между полосками не оставалось промежутка (однако при этом спектры не должны находить друг на друга), для того чтобы свести до минимума исправления, необходимые ввиду кривизны спектральных линий. Щель спектроскопа снабжена затвором, позволяющим по желанию открывать или прикрывать отдельные участки щели. При фотографировании спектра звезды затвор щели устанавливается таким образом, что середина щели остается открытой только на очень небольшом протяжении.

Спектр сравнения получается таким путем, что та часть щели, через которую был заснят спектр звезды, закрывается и открывается боковая часть щели. С помощью конденсорной линзы на эту часть щели проектируется изображение дуги или искры. Соответственно подбирается продолжительность экспозиции. Двукратное фотографирование спектра сравнения представляет несомненные удобства. Первая экспозиция делается до фотографирования звезды, а вторая после него. Один спектр сравнения лежит по одну сторону спектра звезды, а другой — по другую. Таким путем удается констатировать, произошли ли какие-нибудь изменения (сотрясения и т. д.) в спектроскопе, так как они должны были бы сказаться в смещении спектров сравнения.

Опишем еще один метод получения спектров сравнения. В данном случае пользуются двумя небольшими призмами полного

внутреннего отражения, укрепленными непосредственно перед щелью. Призмы не закрывают собой средней части щели, сквозь которую происходит фотографирование звезды. Спектры сравнения по этому способу получаются таким образом, что свет от сравниваемого источника света падает сбоку, его можно направлять в любое время и даже не прерывая экспозиции звезды.

Существуют различные способы для установления, действительно ли звезда во время экспозиции остается в нужном положении относительно щели. Опишем один из них как наиболее удобный и простой.

Края щели сделаны из металла, отполированы и очень слабо скошены к краю. Так как кажущийся диаметр звезды больше ширины щели, то свет звезды, не могущий попасть в спектроскоп, под определенным углом отражается от скошенных поверхностей щели. Если этот отраженный свет уловить зеркальной призмой и направить в небольшую зрительную трубку, то в последней видно зеркальное изображение звезды на краю щели.

Спектрограмма промеряется в компараторе, т. е. положение отдельных линий в спектре звезды сравнивается с соответственными линиями спектров, служащих для сравнения. Обнаруживающиеся смещения линий спектра звезды соответствуют движению звезды в направлении визионного радиуса. Измерения такого рода с большим успехом производились в американских обсерваториях, и достигнутая при этом точность оказалась чрезвычайно удовлетворительной.

Найдено, что солнце движется в пространстве к точке с прямым восхождением, равным $18_h$, и склонением, равным 30°, что могло быть выведено из наблюдений среднего направления собственного движения звезд. Из средней величины направлений скорости спектроскопических визионных радиусов можно установить не только направление, но и скорость этого движения. Кемпбелл определил скорость последнего в 20 *км/сек.*

Принцип Допплера-Физо использован также для вычисления периода полного оборота (времени вращения) солнца. При наблюдении солнечных пятен оказалось, что восточная точка солнечного экватора приближается к земле со скоростью около 2 *км/сек*, а западная на ту же величину удаляется. Ввиду этого спектральные линии кажутся для восточной точки смещенными в направлении фиолетового конца спектра, а для западной — в направлении красного. При помощи соответствующей комбинации двух призм полного внутреннего отражения, поставленных перед щелью, два спектра, идущие от двух диаметрально противоположных сторон солнца, проектируются друг на друга так, что имеющиеся смещения становятся легко измеримыми. Этот способ очень удобен при визуальных наблюдениях. В фотографическом методе обе противоположные конечные точки солнечного экватора наводят на щель спектроскопа последовательно одну за другой, при этом затвор щели устанавливается таким образом, чтобы оба спектра не находили один на другой. В обоих спектрах линии поглощения, зависящие от водяных паров и кислорода земной атмосферы, оказываются н е с м е щ е н н ы м и (точно так же, как

и линии, зависящие от солнечной атмосферы) и в обоих спектрах они оказываются на одинаковых местах — в виде прямых линий. Это обстоятельство может быть использовано для констатирования происшедших смещений прибора.

Продолжительность периода вращения солнца, вычисленная указанным способом, в общем хорошо согласуется с результатом, получающимся из наблюдения солнечных пятен. Адамс, пользуясь мощными инструментами Монт-вильсоновской обсерватории, сделал поразительный вывод: спектральные линии высоких слоев солнечной атмосферы приводят к исчислению более короткого времени вращения, чем спектральные линии более низко расположенных слоев.

## Об'ективная призма

Физические свойства звезд можно изучать, и не прибегая к щелевому спектроскопу. Изображение звезды есть светящаяся точка. Если свет, исходящий от звезды, сначала проходит призму и затем собирается в фокальной плоскости собирательной линзы, то здесь образуется очень чистый спектр без пользования щелью и коллиматором. Так как этот спектр представляет собой узкую яркую полоску, в которой трудно различить отдельные линии, то для уширения этой полоски необходимо применить специальный прием. Уширенная полоска представляет собой резко вырисованный спектр, доступный точному исследованию. При пользовании щелевым спектроскопом бо́льшая часть света, приходящего от звезды, щелью не пропускается и не до́ходит до фотографической пластинки. В случае применения об'ективной призмы на фотографическую пластинку попадает весь свет (за исключением теряющегося на отражение и поглощение), так что при сравнительно малых отверстиях могут быть получены приемлемые спектры даже от очень слабых звезд. Ввиду того что об'ектив телескопа обладает в то же время большим углом поля зрения, можно, применяя об'ективную призму, на одном снимке получить хорошие спектры целого ряда звезд.

На основании снимков, сделанных с помощью об'ективной призмы, обсерваторией Гарвардского колледжа составлен новый каталог Дрэпера — указатель спектров почти четверти миллиона звезд. Примененная в этой обсерватории зрительная труба Баха снабжена фотографическим дублетом (об'ективом, состоящим из двух групп линз) с отверстием в 200 *мм* и фокусным расстоянием 125 *мм*. Угол поля зрения об'ектива имеет величину около 10°. Спектры получаются следующим образом. Перед об'ективом укрепляется призма квадратного (поперечного) сечения со стороной в 8 дюймов (200 *мм*) из тяжелого (сильно преломляющего) флинтового стекла. Преломляющий угол призмы около 13°; в некоторых случаях применяется призма с преломляющим углом около 5°.

Дисперсия призмы такова, что расстояние между линиями $H\beta$ ($\lambda = 4861$ Å) и $H\varepsilon$ ($\lambda = 3970$ Å) равно в спектре 5,2 *мм* или 2,2 *мм*. Упомянутая зрительная труба установлена в Арекипе

14*

(Перу) с целью фотографирования звезд южной части неба; аналогичным инструментом пользовались в Кэмбридже (САСШ) для фотографирования северного звездного неба.

С помощью призмы с более сильной дисперсией получают удовлетворительные спектры звезд до 6-й величины; применяя призму с более слабой дисперсией, можно получать спектры еще более слабых звезд.

Позже был использован особый прием для изменения дисперсии об'ективной призмы с тем, чтобы таким образом можно было применяться к яркости снимаемых звезд. Берут две призмы с почти одинаковым преломляющим углом (около 6°) и устанавливают таким образом, что их можно повернуть относительно друг друга на любую величину. Если призмы поставить во взаимно противоположных положениях, они почти нацело компенсируют друг друга, т. е. их совместное действие почти равносильно действию плоскопараллельной пластинки; если же обе призмы направлены одинаково, то дисперсия каждой призмы приблизительно удваивается.

Метод работы с этими призмами очень прост. Призма устанавливается перед об'ективом таким образом, чтобы ее преломляющая грань была параллельна экватору (зрительная труба конечно монтирована экваториально), вследствие чего спектр располагается в направлении север—юг и лентообразно уширяется вследствие того, что движущему механизму зрительной трубы сообщается скорость, отличная от скорости звезды.

Качество полученных при этом спектров не равно качеству спектров, полученных при помощи щелевых спектроскопов, так как резкость отдельных спектральных линий зависит от качества изображений звезд. Сделанные в ночи, мало благоприятные для наблюдений, эти снимки оставляют желать очень много лучшего. Кроме того при пользовании об'ективной призмой почти невозможно, во всяком случае очень трудно, побороть случайные температурные колебания и прогибы зрительной трубы.

Несмотря на все это, спектры, полученные с помощью об'ективной призмы, отлично приспособлены для определения важнейших физических свойств звезд.

Главной целью, для которой предназначались сделанные работы, было создать классификацию звезд на основании их физических свойств.

Первую систематическую классификацию звездных спектров провел в 1867 г. Зекхи. Он установил четыре главные типа спектра, отличающиеся количеством и интенсивностью спектральных линий. Повсеместно принятая в настоящее время классифакация — это классификация, выработанная обсерваторией Гарвардского колледжа на основании тщательного изучения звездных спектров (полученных описанным выше путем с помощью об'ективной призмы).

Спектры делятся на группы, обозначаемые буквами алфавита, причем таким путем указывается последовательность стадий развития звезды. Прежнее обозначение также сохранено в тех случаях, когда постепенно на основании более поздних данных нуж-

но было менять последовательность групп, некоторые же группы отпали, так как оказались излишними.

Ниже мы постараемся суммировать наиболее важные положения, установленные на основании этих исследований. Отдельные звездные спектры обнаруживают незначительные, но ясные различия по сравнению со своим типом. Свыше 99% всех звездных спектров укладываются в одну из 6 основных групп, признанных наиболее важными. Эти группы обозначены буквами: *B*, *A*, *F*, *G*, *K* и *M*.

Так как упомянутые группы образуют непрерывный ряд, то, пользуясь десятичной системой, можно включить промежуточные типы, например *B5A* означает промежуточный тип между *B* и *A*. Почти все остальные звезды, не вошедшие в упомянутые выше 6 групп, приходятся на группы *P*, *O*, *R* и *N*, из коих *O* в общем ряду несомненно должна стоять перед *B*, а *R* и *N* повидимому заключают ряд на другом конце.

Мы увидим, что состав всех звезд в общем один и тот же. Различие же в спектрах зависит главным образом от того, что единственная физическая переменная в звездной области — температура — неодинакова у различных звезд.

Критерием, положенным в основу классификации звезд (на основании спектров), является различная интенсивность отдельных групп линий поглощения в различных спектрах.

Поглощение линий гелия например обнаруживается сначала в группе *Oe* (в предшествующей ей группе эти линии выглядят ярко), затем поглощение усиливается, достигает максимума у *B2*, после чего снова уменьшается и у *B9* совсем исчезает.

Линии водорода, яркие у групп *P*, *Oa*, *Ob* и *Oc*, в группе *Od* появляются уже в качестве линий поглощения, максимума поглощение достигает у *Ao*, затем уменьшается и вовсе прекращается у *Mb*.

Линии кальция — это линии, вызванные ионизацией при *H* и *K*, возникающие при высокой температуре, появляются в группе *Od*, достигают максимума ясности *Ko*, и исчезают в *Md*.

Линия кальция $\lambda = 4227$ Å, характерная для низких температур, появляется сперва в *B8* и постепенно становится яснее; она достигает своего максимума ясности в *M* (а именно в конце этой группы).

Зага[1] показал, что упомянутые выше свойства спектральных линий могут быть об'яснены на основании ионизации газовых мелекул — они сводятся к температурным влияниям. Температура звезд увеличивается, начиная с типа *M* (от 4 000° K), идет через *G* с температурой в 7 000° K (солнце является карликовой звездой этого класса) к *O* (при *O* приходится допустить температуру около 22 000° K).

Группа (класс) *B*, стоящая вверху нашего ряда, охватывает газообразные туманности, характеризующиеся яркими линиями $\lambda = 4059$ Å и $\lambda = 5007$ Å, в то время как класс *M* на противоположном конце нашего ряда отличается своими полосатыми спек-

[1] Proc. Roy. Soc. Vol. A, 99, 697.

трами, среди которых особо характерны полосы окиси титана. Помимо этих признаков заслуживает внимания следующее: при переходе от $B$ к $M$ интенсивность синего конца спектра по сравнению с красным уменьшается. Это обстоятельство используется для определения цвета звезд на основании фотографической актиничности их излучения.

### Эфективные длины волн

Если перед об'ективом зрительной трубы поместить грубую решетку, то в фокальной плоскости об'ектива по обе стороны от срединного изображения образуются короткие дифракционные спектры, расстояние которых от срединного изображения находится в функциональной зависимости от решеточного интервала, длины фокусного расстояния об'ектива и актиничных (эфективных) длин волн света, исходящего от звезды.

Если $a$ — просвет между прутьями решетки, $d$ — ширина прута решетки, $f$ — фокусное расстояние об'ектива и $D$ — измеренное расстояние между двумя дифракционными спектрами первого порядка, то можно написать, что

$$\lambda_{eff} = D\,\frac{a+d}{2f}.$$

Если $B$ есть яркость срединного изображения без применения решетки, а $B_m$ — яркость дифракционного спектра $m$-го порядка, то

$$B_0 = B\,\frac{a^2}{(a+d)^2},$$

где $B_0$ означает яркость срединного изображения, полученного с применением решетки.

Затем

$$B_m = B\,\frac{1}{m^2\pi^2}\,\sin^2\frac{am\pi}{a+d}.$$

Если ширина прута решетки равна ширине просвета между прутьями, то предыдущие уравнения принимают следующий вид:

$$B_0 = \frac{1}{4}\,B, \quad B_m = B\cdot\frac{2}{m^2\pi^2}\,\sin^2\frac{1}{2}\,m\pi.$$

В этом случае спектр первого порядка имеет наивысшую возможную для побочного спектра яркость; мы получаем:

$$B_1 = \frac{1}{10}\,B, \quad B_2 \text{ отпадает}, \quad B_3 = \frac{1}{9}\,B_1.$$

Гринвичская обсерватория[1] опубликовала различные работы, имеющие целью пополнение данных каталога Дрэпера, в особен-

[1] См. также E. Hertzsprung, Astrophys. Journ., Bd. 42, 1; Lindblad, Arkiv för Math. etc., Bd. 13.

ности же много работ, посвященных определению спектрального типа слабых звезд.

С этой целью применялись 750-миллиметровый зеркальный телескоп и решетка, состоящая из прутьев диаметром около 1,5 *мм*. Среднее расстояние между серединами прутьев 3,0 *мм* (т. е. ширина просвета равна ширине прута), расстояние между двумя спектрами первого порядка в плоскости фотографической пластинки приблизительно равно 1 *мм*. При продолжительности экспозиции в 10 минут можно было фотографировать спектры звезд 11-й величины.

| Спектральный класс | Эфективная длина волны в Å | Спектральный класс | Эфективная длина волны в Å |
|---|---|---|---|
| $Oe_5$ | 4 074 | $F_2$ | 4 269 |
| $B_2$ | 4 148 | $F_5$ | 4 285 |
| $B_3$ | 4 150 | $F_8$ | 4 296 |
| $B_5$ | 4 174 | $G_0$ | 4 306 |
| $B_8$ | 4 242 | $G_5$ | 4 394 |
| $B_9$ | 4 230 | $K_0$ | 4 468 |
| $A_0$ | 4 261 | $K_2$ | 4 496 |
| $A_2$ | 4 271 | $K_5$ | 4 538 |
| $A_3$ | 4 273 | Ma | 4 538 |
| $A_5$ | 4 271 | Mb | 4 491 |
| $F_0$ | 4 275 | N | 4 572 |

В вышепомещенной таблице сопоставлены измеренные эфективные длины волн различных звезд и их спектральные классы (на основании каталога Дрэпера). Из нее мы видим, что эфективные длины волн не идут параллельно ряду спектральных классов. В то время как между $B$ и $A_3$, а также между $G$ и $K_5$ имеет место равномерное возрастание длины волны, между $A_3$ и $G_5$ имеется ясно выраженный перерыв. Это обстоятельство неприятно тем, что эфективные длины не могут быть использованы в целях точной классификации звезд по системе Гаварда. Во всяком случае эфективная длина волны дает в руки средство классифицировать звезды с меньшей яркостью по их «цвету».

Отличный метод определения цвета звезды предложен Сиаром (Иорская обсерватория). Этот метод основан на фотографировании звезд, при котором продолжительность экспозиции возрастает, как геометрический ряд.

Ряд звезд фотографируется сначала сквозь синий, а затем желтый фильтр на изохроматической пластинке с помощью зеркального телескопа, который ввиду его ахроматичности очень удобен для этих целей. Желтый фильтр поглощает очень много актиничного света, и потому при пользовании им необходимо 8—10-кратное удлинение экспозиции, требующейся при синем фильтре для получения под обоими фильтрами одинакового почернения (плоскости).

Освещают одну и ту же пластинку под синим фильтром примерно 20 сек., 1 мин. и 3 мин., а под желтым 160 сек., 8 мин. и 24 мин., причем при каждой следующей экспозиции пластинка сдвигается. Полученные снимки располагают в две колонки так, чтобы «синие» снимки были собраны в одной колонке, а «желтые» — в другой. Если звезда отличается синим светом, то «синие» снимки получатся более темными, если же звезда имеет ясный красный цвет, то «желтые» будут темнее, т. е. сильнее выражены. На основе измерений ряда «нормальных звезд» можно вывести цифровые показатели для классификации отдельных типов звезд.

## Абсолютная величина яркости звезд

Мы утверждали, что спектры наших классов звезд меняются с одной переменной и эта переменная — температура звезды. Локьер первым выдвинул доказанное впоследствии Русселем утверждение, что в спектре дана история развития звезды. Звезда при возникновении имеет чрезвычайно большие размеры, малую плотность и низкую температуру. В этой стадии она имеет красноватый цвет. В силу гравитационных воздействий постепенно звезда уплотняется, вследствие чего увеличивается температура и цвет звезды становится все более светлым. В конечном итоге она переходит в стадию, в которой ее лучистая теплота находится в равновесии с теплотой, образующейся в результате постепенного сжатия; в этой стадии звезда обладает своей наивысшей температурой, после чего она снова охлаждается, постепенно принимая все цвета, которыми она обладала до достижения своей максимальной температуры. При возникновении звезда принадлежит к типу М, по мере уплотнения она проходит через типы К, G, А и В, причем В является стадией самого горячего состояния (звезда имеет белый цвет), какое только возможно для звезды. После этого она снова последовательно охлаждается и в обратном порядке проходит стадии А, G, К и до М. В восходящем ряду звезда называется *гигантом*, в нисходящем — *карликом*. Солнце например является карликом класса G.

До самого последнего времени не умели различать спектры гигантов от спектров карликов одного и того же класса. Адамсу и Кольшюттеру удалось на основе проведенного в Монт-вильсоновской обсерватории тщательного изучения спектров известных гигантов и карликов установить определенные, хотя и незначительные отличия, которые приводим ниже.

1. Сплошной спектр гигантов (или очень ярко светящих звезд) по сравнению со спектром карлика (или менее яркой звезды) обладает в фиолетовой области относительно меньшей яркостью, чем в красной.
2. Во многих классах линии водорода в спектре карликов слабее, чем в спектре гигантов.
3. Некоторые другие линии у карликов выражены сильнее, чем у гигантов, и наоборот.

Эти факты наводят на мысль, что по спектру звезды можно судить о ее величине. После тщательного изучения было решено

в качестве критерия абсолютной яркости принять особенности, упомянутые в п. 3. С этой целью составлена следующая таблица, в которой сопоставлены спектральные линии:

| Линия λв Å | Элемент | У звезд | | В спектре | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | большей | меньшей | искровом | дуговом |
| | | яркости | | | |
| 4 077 | Sr | сильная | слабая | сильная | слабая |
| 4 215 | Sr | „ | „ | „ | „ |
| 4 290 | Ti | „ | „ | „ | „ |
| 4 455 | Ca | слабая | сильная | слабая | сильная |

Из этой таблицы легко усмотреть следующее: линии повышенной или высокой температуры λ = 4 077, 4 215 и 4 290 Å в спектрах ярко светящих звезд ясно выражены, в то время как линия более низкой температуры λ = 4 455 Å в спектрах тех же звезд лишь слабо заметна. На этом еще нельзя строить заключения о более высокой температуре ярко светящих звезд, так как на интенсивности линий весьма существенно отражается плотность окружающих звезду паров.

Суждение об абсолютной яркости звезд можно было составить только на основе сравнения приведенных характеристических линий с другими аналогичными по интенсивности или родственными линиями, вид которых не зависит от яркости звезды. Для сравнения послужили следующие линии железа: λ = 4 072, 4 250, 4 271, 4 462, 4 495 Å. Эти линии были для всех классов звезд одинаково применимы.

Для звезд классов от A до F7 сравнивались:

λ = 4 077 Å Sr с λ = 4 072 Å Fe,
λ = 4 290 „ Ti „ λ = 4 271 „ Fe.

Для звезд классов от F8 до G сравнивались:

λ = 4 077 Å Sr с λ = 4 072 Å Fe,
λ = 4 215 „ Sr „ λ = 4 250 „ Fe,
λ = 4 290 „ Ti „ λ = 4 271 „ Fe,
λ = 4 455 „ Ca „ λ = 4 462 „ Fe,
λ = 4 455 „ Ca „ λ = 4 495 „ Fe.

Для звезд классов от G до M сравнивались:

λ = 4 215 Å Sr с λ = 4 250 Å Fe,
λ = 4 455 „ Ca „ λ = 4 462 „ Fe,
λ = 4 455 „ Ca „ λ = 4 495 „ Fe [1].

[1] Astrophys. Journ. 53, 13.

Спектры, на которых основывались при исследованиях в Монтвильсоновской обсерватории, получались с помощью щелевого спектроскопа. Было установлено, что хорошие спектры, полученные с помощью об'ективной призмы, тоже годятся для исследований этого рода. Обсерватория Гарвардского колледжа тщательно исследовала этот вопрос. Также и Локьер в своих работах в Норман-локьерской обсерватории в Сидмау пользовался об'ективной призмой.

## Спектрогелиограф

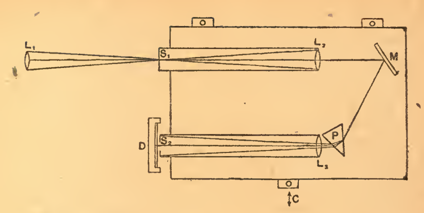
Гейль и Десландерс независимо друг от друга изобрели в 1890 г. спектрогелиограф. Этот прибор предназначен для монохроматического фотографирования солнечного диска, т. е. фотографирования в свете определенной требуемой длины волны.

Весь солнечный диск дает спектр поглощения с темными линиями, относительно которых установлено, что они кажутся темными только по сравнению с ярким сплошным спектром более горячего солнечного ядра. Каждая отдельная линия, будучи изолирована из сплошного спектра, кажется яркой и испускает то же самое излучение, как и раскаленный газ, для которого она характерна. Поэтому изображение солнечного диска можно получить в свете отдельных линий или, вернее, длин волн, пропускаемых щелью спектроскопа (распределение линий связано с распределением газов). Если щелью спектроскопа водить по солнечному диску, то последовательно возникают изображения, которые, будучи соответствующим образом собраны, дадут полное изображение солнца в свете длины волны, соответствующей определенному газу (в соответствии с его распределением).

Только что нами изложен принцип, на котором основано устройство спектрогелиографа. Строение прибора показано на рис. 84. Буквой $L$, обозначен об'ектив зрительной трубы с длинным фокусным расстоянием; большое фокусное расстояние берется затем, чтобы в плоскости первой щели $S_1$ получить по возможности большое первичное изображение солнца.

Свет, проходящий через эту щель ($S_1$), превращается в параллельный пучок коллиматорной линзой $L_2$ и затем зеркалом $M$ отклоняется на призму $P$ или на помещаемую в этом месте решетку. Здесь возникает спектр, который с помощью об'ектива $L_3$ подводится к плоскости щели $S_2$. Щель $S_2$ должна перемещаться вдоль спектра таким образом, чтобы она проходила через линию требуемой длины волны. Остающаяся часть спектра задерживается пластинкой щели. Кассета с фотографической пластинкой монтирована на самостоятельной подставке так, что светочувствительный слой лежит возможно ближе к плоскости щели $S_2$.

При наличии такого устройства имеется возможность изолировать определенные линии (длины волн) спектра источника света, излучение которого направляется на щель $S_1$. Для того чтобы иметь возможность фотографически запечатлеть отдельные части какого-либо участка солнца, весь спектрогелиограф, включая коллиматор, зеркало, призму и камеру, должен быть приспосо-




84. Схема спектрогелиографа

блен к равномерному передвижению по всей снимаемой поверхности, причем это перемещение должно быть возможно в перпендикулярном направлении вдоль щели $S_1$ и $S_2$. С этой целью весь инструмент монтирован на доске, покоящейся на трех твердых стальных шарах, и может прямолинейно перемещаться; движущий механизм $C$ обеспечивает равномерность движения.

Обычно для фотографирования с помощью спектрогелиографа используют свет линий водорода (в особенности яркой линии $H_\alpha$) или линий кальция, отчетливо выступающих в солнечных факелах и дающих особенно отчетливые изображения в ультрафиолетовом свете, $\lambda = 3\,968$ Å и $\lambda = 3\,933$ Å, H и K.

Обычно линия $\lambda = 3\,968$ Å появляется совместно со смежной линией водорода $\lambda = 3\,970$ Å, почему для фотографирования в целях облегчения различия избирается линия $K$. Вторая щель $S_2$ с помощью юстировочного приспособления точно устанавливается на линию $K$. После этого середину изображения солнца наводят на щель $S_1$, кладут фотографическую пластинку в кассету $D$ и открывают затвор. Весь прибор устанавливается сначала таким образом, что первая щель $S_1$ лежит вне солнечного диска, затем сдвигают прибор таким образом, чтобы первая щель постепенно проходила от одного края солнца к другому; в это время в фокальной плоскости линзы $L_3$ производится с'емка.

Во время этого движения вторая щель $S_2$ проектирует на пластинку излучение кальциевого света от всех частей солнца, где линия кальция ярко выступает. Соответствующим рядом снимков может быть установлена вся кальциевая атмосфера солнца. Аналогичным образом используя монохроматическое излучение водорода или железа и т. д., можно определить распространение этих элементов по поверхности солнца.

Описанный прибор с различными видоизменениями был применен в различных местах. Результаты, полученные с помощью та-

кого метода исследования, несомненно очень важны для распознания состава солнечной атмосферы.

Хэль в 1908 г. наблюдал, что снимки факелов, сделанные в свете линий водорода, обнаруживают ясную вихревую структуру в участках, окружающих солнечные пятна. На основании этого наблюдения была выдвинута гипотеза, что солнечные пятна следует рассматривать как получившиеся в результате ионизации солнечной атмосферы вихри наэлектризованных частиц, движущихся с громадной скоростью и дающих на участках солнечных пятен магнитные поля. Исследования эфекта Зеемана привели к непосредственному выяснению вихревого явления и разрешают допустить наличие магнитного поля в солнечном пятне.

Зееманн в 1896 г. показал следующее: когда свет проходит сильное магнитное поле, то определенные линии его спектра расщепляются на дублеты или триплеты.

Если рассматривать свет по направлению, поперечному силовым линиям, то спектральная линия кажется симметрично расщепленной на три части, каждая часть линейно поляризована. Плоскости поляризации двух боковых компонентов параллельны силовым линиям магнитного поля, а плоскость поляризации среднего компонента перпендикулярна силовым линиям.

Если же наблюдать свет по направлению силовых линий, то средний компонент отсутствует, два боковые компонента циркулярно поляризованы во взаимно противоположных направлениях. Если слюдяную пластинку «четверти волны» и призму Николя поместить перед щелью спектроскопа, то циркулярно поляризованный свет обратится в линейно поляризованный. Вращая николь, можно каждый из боковых компонентов по желанию свести на-нет. Далее, когда поляризационный прибор установлен так, что один компонент исчезает, то, меняя направление тока в витках магнита на обратное (или же перемещая полюса), можно добиться, что компонент этот вновь появится, а другой потухнет. Величина, на которую компоненты отстоят друг от друга, зависит от силы магнитного поля.

Если щель спектроскопа направить на солнечное пятно, то некоторые спектральные линии оказываются усиленными, а некоторые ослабленными. Это явление отчасти следует отнести за счет того, что в относительно более холодном пятне и в окружающей области элементы ионизированы с различной силой. Основную же причину этого явления надо искать в эфекте Зееманна. Имеющиеся в данном случае линии можно проанализировать с помощью поляризационного прибора. Этим путем определяется как направление полярности, так и сила магнитного поля.

Описанным методом в настоящее время пользуются для установления магнитной полярности солнечных пятен[1].

Исходя из методов, выработанных на изложенных выше основаниях, в самое недавнее время было исследовано магнитное поле солнца. Результаты получены на основании большого числа фотограмм.

[1] Halle и т. д. Astrophys. Journ. **49**.

## Солнечные затмения

Наше знание природы солнечной короны было бы очень слабым, если бы нельзя было привлечь фотографию в течение непродолжительных моментов, оказывающихся в нашем распоряжении для исследования короны во время полного солнечного затмения. Однако подобные снимки не так просто сделать. Полное солнечное затмение обычно удается хорошо наблюдать только с определенных мест, которые большей частью трудно доступны, и потому доставка туда необходимых инструментов сопряжена с большими затруднениями. Если нужно сделать снимки в большом масштабе, для чего необходимы длиннофокусные об'ективы, то обычно пользуются цэлостатом для отклонения (отражения) лучей в фотографический телескоп, монтируемый горизонтально. Подвижно только зеркало цэлостата, движимое часовым механизмом так, что изображение солнца все время не сходит с фотографической пластинки.

При наблюдении эйнштейновского отклонения направления света вследствие влияния солнечной массы необходимо соблюдение определенных мер предосторожности при желании получить пригодные результаты.

Согласно эйнштейновской теории притяжения массы (гравитации), луч света, проходящий вблизи солнца, должен отклониться по направлению к солнцу таким образом, как если бы он обладал массой, причем это отклонение должно быть вдвое больше ожидаемого по закону тяготения Ньютона.

Если бы можно было наблюдать звезду в положении, при котором ее свет проходил бы мимо края солнца, то, по теории Эйнштейна, эта звезда казалась бы смещенной от солнца на величину 1,75″. Если бы звезда находилась в таком положении, что ее свет проходил бы мимо солнца на расстоянии двух солнечных радиусов (считая от центра солнца), то можно было бы ожидать смещения в 0,88″, при расстоянии в три солнечных радиуса смещение сотавляло бы 0,58″. Смещение таким образом уменьшается по мере удаления от центра солнца. Подобные наблюдения возможны только в условиях солнечного затмения.

Если во время солнечного затмения сфотографировать звезды, расположенные вблизи солнца, и сравнить этот снимок с фотограммой той же самой части неба, сделанной в такое время, когда поблизости не было солнца, то звезды, стоявшие во время солнечного затмения очень близко к солнцу, окажутся сильнее смещенными, чем звезды, находившиеся дальше. Этот метод исследования был применен для проверки теории Эйнштейна во время солнечного затмения в 1919 г. Полученный результат подтвердил правильность теории.

Описанный метод однако неудобен, так как с помощью него получается не абсолютная, полная величина эйнштейновского отклонения, а лишь разность величин отклонения для близлежащих и дальше расположенных звезд. Таким образом, когда в непосредственной близости от солнца нет ярких звезд, то разность смещения по сравнению с удаленными звездами будет незначитель-

на. Поэтому для фотографирования следующего затмения предпочтительнее воспользоваться другим методом. А именно: сначала фотографируют удобно расположенную группу звезд, не настолько близко лежащую к солнцу, чтобы в силу тяготения она могла участвовать в этом явлении; на той же самой пластинке фотографируют другую группу звезд, на излучении которой тяготение скажется — оба снимка делаются во время солнечного затмения. Затем обе группы снова фотографируются на другой пластинке после того, как солнце продвинулось дальше. Таким путем измерения в обеих фотографиях оказываются очень точно сравнимыми; в таких фотограммах можно определить полное эйнштейновское отклонение.

Спектр хромосферы очень интересен как раз во время затмения; в настоящее время с помощью большого монт-вильсоновского телескопа его можно наблюдать и без всякого затмения.

Лишь в немногих отделах астрономии совершенно отсутствует возможность использования фотографических методов. Ясно конечно, что например визуальное наблюдение двойных звезд предпочтительнее фотографического, когда речь идет о звездах, лежащих чрезвычайно близко друг к другу. При наличии некоторого ощутительного расстояния между звездами в паре фотографический метод несомненно полезен.

Герцшпрунг в Потсдаме достиг очень хороших результатов при фотографировании двойных звезд, применяя методы, с помощью которых удается избежать ошибок в изображении, происходящих вследствие атмосферного рассеяния света в случае различно окрашенных звезд: он фотографировал только узкий участок желтой цветной зоны спектра и таким образом приводил обе звезды к одному цвету.

При определении деталей на планетах астроном, производящий исследование визуально, оказывается в более выгодном положении, чем астроном, применяющий фотографию, так как первый в состоянии моментально использовать подходящие условия; все же и здесь фотография оказывается прекрасным вспомогательным средством исследования, дающим ценные и сохраняющиеся документы.

## Литература


K. Graff, Grundriss der Astrophysik, Leipzig—Berlin, 1928, B. G. Teubner.

Die Kultur der Gegenwart, ihre Entwicklung und ihre Ziele, herausgegeben von Paul Hinneberg, 3. Teil, 3. Abt, 3 Bd., Astronomie unter Redaktion von J. Hartmann, Leipzig—Berlin 1921, B. G. Teubner.

Newcomb-Engelmanns Populäre Astronomie, 7. Aufl., herausgegeben von H. Ludendorff, Leipzig 1922, Wilh. Engelmann.

Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, herausgegeben von der Schriftleitung der „Naturwissenschaften", Bd. 1 (1922), Artikel. R. Prager, Die Fortchritte der Astronomie im Iahre 1921, Bd. 2 (1923), Artikel: J. Hopmann, Die Bewegungen der Fixsterne, G. Schnauder, Entwicklung und Stand der Parallaxenforschung; A. Kopff, Das Milchstrassensystem; B. Wanach, Die Polhöhenschwankungen, Bd. 3 (1924), Artikel: A. Brill, Die Strahlung der Sterne; R. Hess, Die Statistik der Leuchtkraft der Sterne; H. Kienle, Die astronomische Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie, Bd. 5 (1926), Artikel: E. Schönberg, über die Strahlung der Planeten, alle Bände, Berlin, J. Springer.

5 ГЛАВА

# ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАФИИ В ФИЗИКЕ

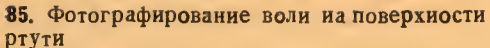
Г. МУСС

Во всех отделах физики есть очень много проблем, уяснение которых возможно с помощью фотографии. Некоторые из них ждали бы своего разрешения до сегодняшнего дня, если не была бы привлечена в помощь фотография, а другие можно было бы решить без фотографии, но только гораздо более сложным путем и не с такой точностью. К первой группе относятся интересные работы Бойса над полетом снарядов, а ко второй — новые работы с положительными лучами; последние много об'яснили в строении материи, устройстве атома и молекулы. В определенных случаях, как например при фотографировании рентгеновыми лучами, пользуются специальными пластинками, в подавляющем же числе случаев, в которых фотография привлекается для физических исследований, обходятся с обычно встречающимися в продаже фотографическими пластинками или пленками, а также со сравнительно простыми аппаратами. Конечно наводка аппарата и все прочие операции должны выполняться очень тщательно для того, чтобы нужное изображение было безукоризненно точным. Обнаруживающиеся в различных случаях трудности, равно как способы их устранения, лучше всего иллюстрировать рядом примеров. Эти примеры послужат руководством всякому намеревающемуся заняться аналогичными исследованиями. Необходимые для этих работ пластинки, аппараты, кассеты и камеры будут по мере изложения описаны в соответствующих местах.

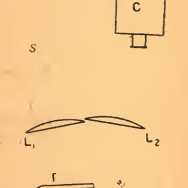
## Моментальные снимки

Имеется большая группа проблем механики, в которых встречаются с необходимостью получения моментальных снимков, т. е. снимков настолько быстро движущихся об'ектов, что нормальный механический затвор оказывается для этой цели слишком медленным и потому не может быть использован для таких с'емок.





**85.** Фотографирование волн на поверхности ртути

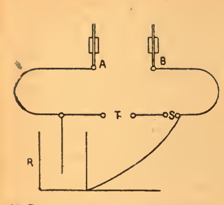



**86.** Расположение аппаратуры для фотографирования волновых движений

Иногда линейная скорость об'екта чрезвычайно велика, иногда об'ект очень мал и движется на очень близком расстоянии от камеры, обладая большой угловой скоростью. В таких случаях направленный на предмет об'ектив камеры почти никогда не диафрагмируется, об'ект ярко освещается в течение очень короткого промежутка времени. Работы конечно должны производиться в затемненной комнате или в закрытом темном ящике. Освещение происходит путем искрового разряда электрического конденсатора. С помощью соответствующих приспособлений продолжительность искры может быть сокращена до одной миллионной доли секунды.

В качестве примера подобной с'емки, при которой не требуется исключительно короткого времени освещения, подробно опишем фотографирование небольших волн в жидкостях. Зная длину волны и частоту таких небольших волн жидкости, можно определить величину их поверхностного натяжения; далее, на основании этих опытов можно подробно изучить явление преломления и отражения волн. На рис. 85 изображено такое сфотографированное волновое движение. Эти волны созданы на поверхности довольно тонкого слоя ртути[1] (снимок сделан д-ром Дж. Винсентом). Аппаратура, посредством которой сделан этот снимок, изображена на рис. 86. В $S$ образуется искра; она находится в фокусе линзы $L_1$, из которой выходит пучок параллельных лучей. Свет падает на поверхности ртути, налитой в плоскую чашку $D$. Отраженный от поверхности ртути свет направляется линзой $L_2$ в с'емочный об'ек-

[1] Proc. Phys. Soc., 15.



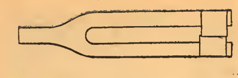

**87.** Включение искровых промежутков *T* и *S* для фотографирования волновых движений



**88.** Вращающийся затворный диск для моментальной семки

тив камеры *C* так, чтобы в об'ектив попало по возможности больше света. Волны возбуждаются камертоном $T_1$, на одном из концов которого укреплен штифт (или гребень с штифтами); конец штифта погружается в ртуть.

Для подобных снимков необходимы высокочувствительные пластинки; в данном случае об'ектив камеры лучше надлежащим образом задиафрагмировать и впоследствии усилить снимок, чем работать при большом отверстии. Камера фокусируется разной наводкой изображения тонкой нити, плавающей на поверхности ртути. Для освещения необходима короткая искра с большой силой света. При соединении обкладок электического конденсатора с концами короткого искрового промежутка в последнем проскакивает слабая искра даже при малой разности потенциалов (т. е. слабом заряде пластинок конденсатора). Чтобы этого не допустить в цепь включается еще один искровой промежуток. Тогда потенциаль разряда определяется длиной второго искрового промежутка. Схема включения дана на рис. 87. Буквами *A* и *B* обозначены оба кондуктора (гребешки) электростатической машины (Гольц-Уимшерста), постепенно заряжающие конденсатор *R;* последний состоит из 4 лейденских банок, соединенных параллельно. Искровой промежуток, предназначенный для освещения поверхности ртути, обозначен буквой *S* (его длина приблизительно 5 *мм*), а больший искровой промежуток длиной в 15 *мм* находится у *T*. Конденсатор *R* заряжается электростатической машиной до достижения потенциала, необходимого для разряда в искровом промежутке *T;* в момент достижения такого потенциала, разряд произойдет как в *T*, так и в *S*. Для предотвращения образования в результате индукции мелких искр искровой промежуток *S* замкнут накоротко кусочком толстой проволоки, смоченной раствором хлористого кальция. Воспроизводимый нами на рис. 85 снимок получен от двух камертонов с числом колебаний 128 и 512 в секунду при соприкосновении их штифтов с поверхностью ртути. Упомянутые волны выходят из центра возбуждения (их средней



**89.** Камертон в роли „затвора“

точки). Рассмотрим волновое движение с более низкой частотой (т. е. с 128 колебаниями в секунду); здесь по прошествии $^1/_{128}$ сек. каждая волна оказывается на том самом месте, где до этого находилась предшествующая ей по времени волна. Если мы воспользуемся затвором, который с интервалами в $^1/_{128}$ сек. открыт очень короткие промежутки времени, то каждый раз будем получать одну и ту же картину, хотя в указанные промежутки времени отдельные волны будут казаться переместившимися в соседнее положение. Если вместо электрической искры мы воспользовались бы обычным источником света, то однократного открывания затвора было бы недостаточно для получения заметного почернения на фотографической пластинке, для чего потребовался бы ряд последовательных экспозиций, при этом во время каждой экспозиции должна была бы сохраняться та же самая картина. Затвор, приспособленный для наших целей, изображен на рис. 88. Он имеет форму диска с узким радиально расположенным щелевидным отверстием и приводится в быстрое вращение. Его угловая скорость рассчитывается таким образом, чтобы сквозь щель волны казались неподвижными. Будет ли частота вращения равна частоте волнового движения или только части последней, все равно действие не изменится; во всяком случае в течение всего времени освещения частота вращения должна оставаться постоянной. Когда частота вращения слишком велика, волны кажутся медленно движущимися по направлению внутрь; когда она слишком мала, кажется, что волны медленно движутся кнаружи. Для того чтобы освободиться от сложного настраивания скорости вращения диска, пользуются затвором, помещаемым или перед камерой или перед источником света и регулируемым камертоном, применяемым в данном опыте, или же другим — с одинаковым числом колебаний. Если на концах камертона укрепить две пластинки из легкого металла, так чтобы краями они немного перекрывали друг друга, когда камертон находится в покое (рис. 89), то во время колебания между пластинками будет образовываться промежуток.

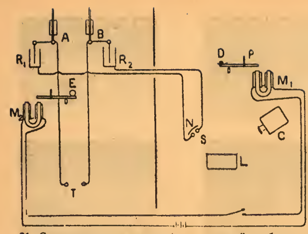
Если мы поместим источник света позади упомянутых пластинок, то снимаемый об'ект будет освещаться только в течение части времени колебания. Таким образом можно получить прерывистое освещение с частотой колебания камертона. Для аналогичных целей можно использовать видоизменение описанного выше способа во всех случаях, когда устройство, вызывающее фотографируемое явление и обладающее закономерной частотой, может быть привлечено к приведению в действие затвора. Если это условие не может быть выполнено, то в качестве затвора пользуются вращающимся диском. В каждом из примененных способов будет иметь место точное повторение одной и той же картины. На рис. 85 каждая волна одной группы за $^1/_{128}$ сек. и каждая волна второй группы за $^1/_{512}$ сек. смещаются в смежное положение.



**90.** Фотографический снимок явления разбрызгивания

Таким образом точное повторение одинаковой картины создается по истечении каждый раз $^1/_{128}$ сек.; при частотах 128 и 512 точное воспроизведение того же самого состояния наступает только по истечении 1 сек.; на протяжении же этого сравнительно продолжительного периода времени посторонние причины каким-либо образом могут вредно отразиться на нашем опыте или же колебания могут вообще прекратиться. На этом основании способ освещения с помощью диска применим реже; способ же освещения искрой имеет универсальное значение.

Описанный выше метод фотографирования волновых движений сравнительно прост, так как не требует никаких особо сложных приспособлений для получения искровых зарядов с короткой продолжительностью: при фотографировании волн совершенно нет необходимости запечатлеть какой-либо один характерный период движения. В отличие от этого в тех случаях, когда предстоит фотографировать быстро меняющееся неравномерное движение или когда искра должна проскочить как раз в тот момент, когда об'ект находится в совершенно особом положении, необходима гораздо более сложная установка. Весьма интересны снимки явлений разбрызгивания, сделанные Уортингтоном, наблюдаемых в тех случаях, когда капли или шарики ударяются о поверхность жидкости. Такие снимки воспроизведены на рис. 90, а на рис. 91 изображена аппаратура, применяемая при упомяну-




91. Схема аппарата для зас'емки ярлений разбрызгивания

той с'емке. В начале опыта шарик или капелька находится в плоской чашке $D$, в свою очередь покоящейся на рычаге, удерживаемом в горизонтальном положении электромагнитом $M_1$. Как только ток, идущий через $M_1$, прервется, левое плечо рычага вследствие освобождения правого плеча опустится вниз, и шарик упадет на поверхность жидкости, находящейся в сосуде $L$.

Этот процесс может быть многократно точно повторен. Таким образом можно получить снимки различных стадий разбрызгивания жидкости; взятые вместе, они демонстрируют течение подобного явления. Место, где происходит разбрызгивание, освещается искрой, получаемой в искровом промежутке $S$ путем разряда внешних обкладок двух лейденских банок $R_1$ и $R_2$. Снимок делается камерой $C$. Концы искрового промежутка (электроды) сделаны из магния, поэтому искра обладает большой яркостью. С помощью вогнутого зеркала $N$ свет концентрируется на участке, где происходит разбрызгивание. Конденсаторы заряжаются электростатической машиной Гольтца-Уимшерста.

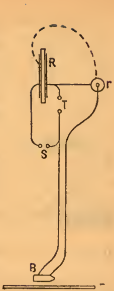
На рис. 91 показаны ее кондукторы $A$ и $B$, соединенные с внутренними обкладками конденсаторов. Эти внутренние обкладки одновременно соединены также с электродами второго искрового промежутка $T$. Электрический ток, намагничивающий электромагнит $M_1$, намагничивает также и электромагнит $M_2$ (слева), приводящий в движение рычаг, на плече которого покоится металлический шарик $E$. Как только прерывается ток, рычаг с лежащим на нем шариком $E$ поворачивается одновременно с рычагом, несущим чашку $D$. Капля или шарик из чашки $D$ падает в жидкость в чашке $L$, и в это же время шарик $E$, падая, замыкает накоротко искровой промежуток $T$. Конденсаторы полностью разряжаются еще до этого, поэтому короткое замыкание в $T$ разряжает внутренние обкладки; наружные обкладки разряжаются в $S$. Таким образом момент наступления разряда можно по желанию регулировать надлежащим выбором длины пути, проходимого шариком, пока он достигает $T$. Таким путем можно фотографировать явление разбрызгивания на любой стадии. Рядом опытов, проведенных над каплями, стекающими вдоль некоторого масштаба, установлено, что промежутки между двумя разрядами можно определять с точностью до $^1/_{500}$ сек. При одновременном фотографировании меток, расположенных по краю очень быстро

вращающегося диска, продолжительность одного искрового разряда определяется менее, чем в одну трехмиллионную долю секунды.

На рис. 90 изображено 6 последовательных стадий падения шарика на поверхность воды; снимки сделаны с промежутками в 0,003 сек. В этом опыте были применены обыкновенные пластинки с последующим усилением.

В качестве последнего примера метода моментальной с'емки с использованием электрической искры опишем метод фотографирования полета пули, предложенный Бойсом. Речь идет о фотографировании ружейных пуль, выходящих из ствола со скоростью около 2 000 *м/сек.*

При такой скорости продолжительность искрового разряда в одну трехмиллионную долю секунды оказывается слишком большой; действительно удается еще больше сократить это время и свести его по крайней мере к части продолжительности искрового разряда, примерно к одной десятимиллионной доле секунды. Электроды искрового промежутка делались из меди или платины, так как электроды из магния, хотя и повысили бы яркость искры, но зато увеличили бы ее продолжительность.




92. Схема включения и устройство затвора для фотографирования летящей пули (по Бойсу)

Из этих соображений применение твердых металлов для изготовления электродов предпочтительнее. При этом пользовались пластиночным конденсатором с параллельными пластинами, со стороной около 30 *см* и зеркальным стеклом в качестве диэлектрика; для проводки была взята медная, очень толстая проволока. Разряд конденсатора наступал под действием самой пули. Необходимая для этого схема включения изображена на рис. 92.

Здесь *S* означает искровой промежуток, при разряде которого снимается фотограмма; *T* — второй искровой промежуток и *R* — конденсатор. Небольшой добавочный конденсатор *r* соединен с большим параллельно, т. е. с одной пластинкой конденсатора он соединен медной проволокой, а с другой — при помощи проволоки, погруженной в раствор хлористого кальция. Две проволоки, выходящие одна из *r* и другая из *S*, образуют вместе более длинный искровой промежуток *B*, замыкаемый накоротко пулей.

Конденсаторы заряжаются таким образом, что их потенциал недостаточен для возникновения искры в *S* или *T;* искра может возникнуть в одном из этих искровых промежутков лишь тогда, когда другой промежуток будет замкнут накоротко. Аналогичным образом искра возникает в *B* или *T*, если один из этих искровых промежутков будет замкнут накоротко. Как только летящая пуля минует участок *B* и замкнет его накоротко, *r* разрядится в *B* и *T*. Искра, образующаяся в *B*, слишком слаба, чтобы подействовать на пластинку расположенную вблизи от проходящей пули, но так как в то же самое мгновение произойдет разряд в ис-

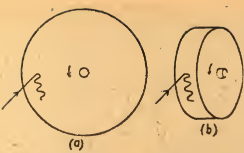


**93.** Летящая ружейная пуля

кровом промежутке *T*, то большой конденсатор разрядится в *S* и *T*, искра *S* даст на пластинке резкий силует пули, — последняя таким образом будет запечатлена. В случае, если бы мы воспользовались простым устройством цепи, то *B* заменило бы собой *T* и в *B* получился бы полный искровый разряд, так как весь заряд конденсатора *R* шел бы через *S*; в результате этого процесса *B* завуалировало бы пластинку. Стремятся получить силуэт пули, так как этим путем полностью используются актиничные лучи действующего света, что невозможно при пользовании об'ективом из оптического стекла вследствие поглощения последнего. На рис. 93 дан снимок летящей ружейной пули. Изображение вполне резкое и ясное. Видимые в снимке наклонные линии, отходящие от передней и задней части пули, об'ясняются сильным сжатием воздуха: эти воздушные волны получаются таким же путем, как и волны вокруг лодки, быстро движущейся в воде. На этом же рис. 93 также видно отражение воздушных волн от твердой поверхности. Бойс фотографировал пули в различные моменты их полета и запечатлел момент, когда пуля пробивает кусок стекла; он показал, что многие проблемы полета пули могут быть разрешены с помощью фотографии. Приложенная Бойсом аппаратура впоследствии была различным образом видоизменена и в настоящее время применяется во многих других аналогичных случаях.

## Запись колебательных (осциллирующих) движений в механике, акустике и электротехнике

Во всех отделах физики, особенно в электротехнике, часто бывает необходимо записать колебания (осцилляции) тела около его среднего положения. Записываемое колебание может быть равномерным или неравномерным, периодически повторяющимся или неповторяющимся (апериодичным). Сначала мы укажем ме-







94. Установка для фотографической регистрации колебаний: слева на падающей пластинке *B*, посредине (*a*) на вращающемся диске, справа (*b*) на боковой поверхности цилиндра

95 Схема осциллографа

тод, применяемый во всех случаях, и затем поясним его примером, а именно записью колебания камертона. Когда луч света падает в направлении *AB* (рис. 94) на зеркало *B* (не изображенное на рисунке), укрепленное на одном из концов вилки камертона, он отражается в направлении *BC*. Если камертон колеблется, то колеблется и отраженный луч, при этом последний описывает угол, вдвое бо́льший угла, описываемого зеркалом. Если отраженный луч улавливался бы неподвижно лежащей фотографической пластинкой *P*, он рисовал бы короткую горизонтальную линию; если во время опыта пластинке *P* дать возможность падать вертикально, то на фотографической пластинке получается кривая, передающая колебание камертона. В этом случае ось «времени» проходит вертикально; соотношения длины по оси времени зависят от участка, пройденного пластинкой до того момента, когда на нее впервые упал отраженный луч. Если пластинка падает просто под влиянием тяжести, то скорость ее постепенно увеличивается, т. е. удлинение шкалы времени возрастает. В дальнейшем мы опишем установку, при которой скорость движения пластинки может быть сделана постоянной. Падающую пластинку, на которой улавливается отраженный луч, можно заменить вращающимся диском, покрытым светочувствительной бумагой (рис. 94*а*), кинематографической пленкой или же просто плоской светочувствительной бумагой навернутой на барабан (рис. 94*в*); конечно диск или барабан должны вращаться с равномерной скоростью. Если требуется исследовать электрические цепи тока, например динамомашины, электромотора, индукционной катушки, микрофона или слуховой телефонной трубки, то пропускают ток (или некоторую часть его) через гальванометр, устроенный в виде осциллографа. С помощью такого прибора удается получить отклонение пучка лучей света, пропорциональное колебаниям тока. На рис. 95 дана схема, передающая в принципе устройство осциллографа. В узком промежутке между полюсными наконечниками *N* и *S* сильного магнита подвешен на колесике из слоновой кости проводник в виде петли, состоящий из двух параллельных проволок или пластинок из фосфористой бронзы; петля рав-



**96.** Осциллографические кривые токов в первичной *A* и вторичной *B* обмотках катушки матнето. *C* — нулевая линия, *D* — крнвая колебания камертона

номерно натянута с помощью пружины. Между обеими частями петли проводника закреплено зеркальце *M*. При прохождении электрического тока через описанную петлю зеркало будет поворачиваться вокруг вертикальной оси вследствие того, что одна проводящая ветвь петли отклонится в одну, а другая — в другую сторону. В случае, когда мы имеем дело с переменным током, зеркало будет колебаться вперед и назад совершенно так же, как если бы оно было укреплено на камертоне (сравни с рис. 94). Если требуется точно записать колебания переменного тока высокой частоты, то собственные колебания осциллятора должны быть совсем малы; это достигается соответствующим сильным механическим напряжением последнего, а также уменьшением его момента инерции. В целях одновременного исследования (или записи) нескольких контуров между полюсами магнита можно поместить несколько осцилляторов. Если сбоку приспособить камертон (частота колебаний которого известна), снабженный зеркалом, то одновременная запись его колебаний позволяет получить шкалу времени. Зеркало, укрепленное неподвижно, дает линию, параллельную нулевой линии кривой тока.

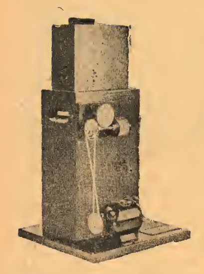
Ниже мы даем описание оптической системы, необходимой для получения резкой записи кривых колебания. Источником света служит дуговая лампа, свет которой собирается конденсаторный линзой и затем пропускается через вертикально поставленную прямоугольную щель в 10 *мм* длиной и 1 *мм* шириной. Расстояние дуговой лампы от конденсатора меняется до тех пор, пока щелевидно задиафрагмированное изображение источника света не уляжется на зеркалах. Свет, отраженный от каждого зеркала, превращается в сходящийся пучок с помощью собирательной линзы, помещенной непосредственно перед зеркалом. Таким путем изображение щели возникает на поверхности, предназначенной для записи кривых. Для превращения изображений щели в яркие пятна света («точки») пользуются горизонтально ориентированными цилиндрическими короткофокусными линзами, включенными на пути лучей. На рис. 96 *A* и *B* обозначены кривые, изоб-

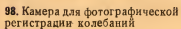
ражающие токи в первичной и вторичной обмотках катушки магнето (автомобильного мотора), *C* — нулевая линия кривой тока, *D* — кривая колебания камертона, служащего для сравнения; число колебаний камертона приблизительно в 2½ раза больше числа колебаний токов. Изображенные кривые получены на пластинке, свободно падавшей под влиянием собственной тяжести. Участок, на протяжении которого пластинка падала до воздействия света, был так велик, что к моменту записи пластинка обладала уже довольно значительной скоростью. Поэтому вдоль всей пластинки шкала времени кажется почти равномерной.



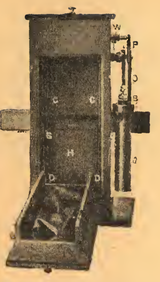
97. Кассета с защитным мешком и мешком для улавливания

Для подобных сҀемок вполне пригодны покупные пластинки. На рис. 97 изображено приспособление для приема пластинки. Пластинка падает в длинной узкой кассете, играющей роль направляющей; вверху имеется мешок из красной или черной материи, служащей для предохранения от света вводимой пластинки, а во втором мешке, на дне кассеты, пластинка улавливается после сҀемки. Вблизи верхнего конца кассеты имеется задвижка, удерживающая пластинку до тех пор, пока не начнется запись. Ближе к нижнему концу кассеты вырезано горизонтальное отверстие, через которое может проникать свет. Там, где требуется медленно движущаяся пластинка, простое устройство описанного рода не может удовлетворить, так как при коротком времени падения шкала времени очень различна вдоль пластинки. На рис. 98 показана камера или, вернее, кассета, при помощи которой скорость пластинки в довольно значительных пределах можно регулировать; кроме того в ней в течение всего времени падения скорость постоянна. Изображенная аппаратура построена Cambridge Scietific Instrument Company. На рис. 99 задняя стенка кассеты откинута для того, чтобы был виден держатель пластинки; входное отверстие для света закрыто. Пластина кладется на салазки *H*, которые в свою очередь движутся по направляющим. *G*, салазки *H* укреплены на нитях *C*. Эти нити внизу проходят под блоком *Д*, а вверху—через соответствующую пару блоков (не видную на рис. 99). Как только пластинка вместе с салазками начинает падать, начинает одновременно с верхними блоками вращаться ось, на которой укреплено лежащее снаружи колесо *W*. Через это колесо *W* переброшен шнур, приводящий в движение плечо эксцентрика *P* и вместе с ним колесо *O* таким образом, что поршень *B*, точно пригнанный к масляному цилиндру *A*, начинает опускаться и подниматься. В поршне *B* имеется клапан, через который масло выдавливается снизу вверх; скорость движения поршня *B* определяется скоростью, с которой масло может проходить через клапан; по истечении короткого времени она приобретает постоянную величину. Скорость поршня *B* регулируется изменением просвета клапана (последнее достигается с помощью градуирован-





**98.** Камера для фотографической регистрации колебаний




**99.** Вид сзади на камеру для фотографической регистрации колебаний

ного колеса *X*). Для того чтобы можно было быстро поднять поршень вверх, последний снабжен еще одним клапаном, через который масло может легко вытекать в нижнюю часть цилиндра. При пользовании камерой (или кассетой) с падающей пластинкой запись электрических токов возможна только при условии очень коротких отрезков времени; это возможно в тех случаях, когда колебания тока периодичны. Когда запись колебаний тока должна быть произведена (или желательна) на протяжении более продолжительного промежутка времени, пользуются установкой, схематически изображенной на рис. 94*b*. Предназначенная для этой цели камера изображена на рис. 98 (построена Cambridge Scientific Instrument Company). В этой камере запись производится на полоске светочувствительной бумаги. Такие конструкции имеются и для полоски пленки. Пользуются рулонами бромосеребряной бумаги длиной до 50 *м*. Бумага движется фрикционным вальцом (приводимым в движение посредством электричества) мимо щели и затем поступает в ящик, из которого может быть вынута для проявления. Скорость электрического мотора, с помощью которого передвигается бумажная лента, можно регулировать; для предотвращения сотрясения камеры мотор обычно крепится на самостоятельном пружинном основании. Таким аппаратом можно регистрировать колебания тока, получающиеся в микрофоне (телефона) при произнесении различных гласных; эти колебания тока обладают высокой частотой. Следует заметить, что обычно такие колебания в случаях, когда требуется наивысшая точность, записываются с помощью другого прибора, так



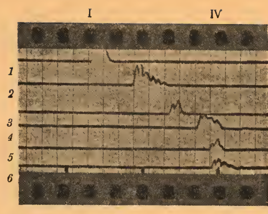

101. Оптическая система, применяемая в соединении со струнным гальванометром

100. Струнный гальванометр

называемого *струнного гальванометра*. Оптическая система, применяемая в соединении с только-что названным инструментом, в некоторых отношениях отличается от систем, описанных до сих пор, поэтому следует более подробно остановиться на ее устройстве.

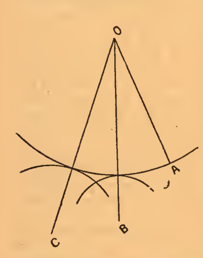
По принципу устройства струнный гальванометр схож с осциллографом, но имеет только одну нить (струну), сделанную обычно из посеребренного стекла (кварца) и натянутую между полюсами сильного электромагнита (рис. 100). Когда через струну идет ток, то в зависимости от направления идущего тока она движется вперед или назад. Ее можно наблюдать сквозь оконце у концов магнита. Если струна очень тонка и достаточно натянута, то и без помощи зеркала, значительно увеличивающего инерцию всей системы, можно записывать очень слабые и очень быстро меняющиеся колебания тока, которым струна очень точно следует. Запись производится таким образом, что струна освещается через отверстие у концов магнита и силуэт этого участка струны запечатлевается на фотографической пластинке или пленке. Оптическая установка изображена на рис. 101. Струна $F$ освещается точечной лампой или положительным кратером дуговой лампы через конденсатор $C$. Свет, проходящий мимо струны $F$, системой линз проектируется на укрепленную перед камерой цилиндрически отшлифованную призму $R$; последняя отбрасывает прямую широкую полосу света на плоскость, в которой находится пластинка или пленка. Движения струны происходят в плоскости, параллельной продольному сечению призмы или распространению полосы света. Положение струны в каждый данный момент изображается темной (неосвещенной) полоской.

Если пластинка движется назад, оставаясь все время в вертикальном положении, то во время движения она подвергается действию света целиком, за исключением места, на котором видно темное пятно. Таким путем легко удается непрерывно записать движение темной полосы. Ниже излагается метод записи шкалы времени, использующий описанный инструментарий; этот метод отличается от предыдущих. Применяемая при этом методе установка состоит из вращающегося диска $D$ (рис. 101), снабженного рядом зубцов, задерживающих через одинаковые промежутки времени свет, посылаемый конденсатором, в то время как просветы между зубцами пропускают свет. Этот диск приводится в движение мотором, равномерность движения которого синхронизируется посредством камертона или колеблющейся плоской пружины.

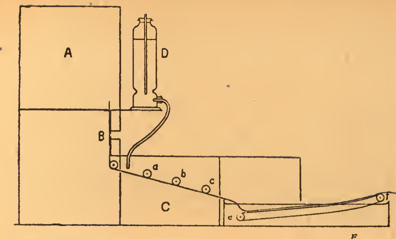


**102.** Регистрация колебаний, тока в 6 микрофонах (*1—6*) микрофон *1* начинает регистрировать звуки в месте против цифры *I*, микрофон *6*—против цифры *VI*.

Промежутки между неосвещенными горизонтальными линиями на пленке, получающиеся при каждом заслонении света зубцом, передают равные отрезки времени. На рис. 102 дан пример полученной таким путем записи кривых, сделанной на кинопленке, при которой шкала времени получена с использованием вращающегося диска. Этот рисунок является репродукцией пленки, на которой с помощью шести не зависящих друг от друга струн, помещенных между полюсами электромагнита, были записаны шесть не связанных друг с другом микрофонных токов, а именно от микрофонов, применявшихся в войну 1914—1918 гг. для целей измерения звука на суше и под водой. Исходя из известной нам скорости распространения звука, можно определить положение скрытого источника звука; это достигается путем улавливания в трех различных местах (приемных станциях звука, исходящего от некоторого источника звука. Допустим, что звук услушан или воспринят в точках *A*, *B* и *C* к моментам времени $t_1$, $t_2$ и $t_3$. Из точки *B*, как центра, описываем круг радиусом $(t_2—t_1)\ v$ и второй круг из точки *C*, как центра, радиусом $(t_3—t_1)\ v$, где $v$ означает скорость распространения звука в воздухе или воде, в зависимости от того, где ставится опыт (рис. 103). Тогда *O* будет центром круга, проходящего через *A* и касающегося обоих кругов, проведенных нами из центров *B* и *C*, и будет источником звука, так как расстояние всех трех станций *A*, *B*, *C* от этой точки таково, что звук достигает точек *B* и *C* на $t_2 — t_1$ или на $t_3 — t_1$ позже, чем он попал в точку *A*. Если наш источник звука лежит близко к линии, соединяющей две приемные станции, то вышеприведенное построение даст очень неточный результат. По этой причине, а также потому, что воспринимающий микрофон какой-нибудь из станций легко может быть



**103.** Схема построения для определения места скрытого источника звука

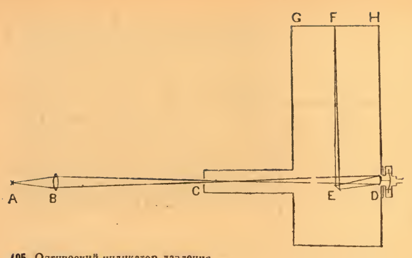



**104.** Автоматическая проявительная машина для проявления полосок бумаги или плеики. С правой стороиы находится фиксажиый бак, через который светочувствительный материал протягивается после проявлеиия

поврежден в силу какой-либо случайности, микрофоны устанавливаются в 6 местах. Исследование производится с помощью гальванометра с 6 струнами. Устанавливая отдельные моменты, в которые возникли токи в микрофонах, а также комбинируя записи из нескольких серий, по три микрофона в каждой, можно определить положение источника звука несколько раз и потому очень точно. Описанные приборы дополняет автомат для проявления, который, будучи связан с камерой, дает возможность получить полосу бумаги или пленки в проявленном виде по прошествии нескольких минут после записи.

Автомат для проявления изображен на рис. 104. Валик с неосвещенной полоской бумаги или пленки находится в ящике *A*, пленка проходит мимо щели *B*, где происходит экспозиция, и поступает в светонепроницаемый ящик *C*, в который из сосуда *D* втекает концентрированный проявитель. Валики *a*, *b* и *c* равномерно распределяют проявитель по поверхности пленки. Проявление закончено, когда пленка выходит из *C* и поступает в ящик *E* с раствором гипосульфита. Пленка проводится через раствор гипосульфита на бесконечном ремне, приводимом в движение с помощью валиков *e* и *f*. С момента выхода пленочной ленты из резервуара *E* процесс фиксирования закончен и можно приступить к исследованию и промеру пленки.

Если регистрируемое движение периодично, т. е. повторяется через равномерные промежутки времени, то применяют другой метод записи кривых. При этом способе регистрационные кривые можно визуально наблюдать до их фотографического запечатления. Этот метод применим для записи колебаний тока динамомашины или электромотора, у которых колебания тока повторяются не менее одного раза при каждом обороте; можно также указать на диаграмму давления в цилиндре паровой машины или




**105.** Оптический индикатор давления

двигателя внутреннего сгорания, у которых одинаковые соотношения давления повторяются после одного или двух оборотов. Разберем несколько конкретных примеров. Когда через осциллограф идет переменный ток, то отраженный от зеркала луч приходит в колебательное движение (в горизонтальной плоскости); «ось времени» получится, если отраженному лучу дать колебаться также и в вертикальном направлении и при этом действовать на неподвижно укрепленную светочувствительную пластинку. Делается это следующим образом: свет, идущий от зеркала осциллографа, улавливается вторым колеблющимся зеркалом, приводимым в колебание небольшим мотором, питаемым от такого же источника. Поэтому движение мотора синхронно с движением осциллографа движение световой точки в вертикальном и горизонтальном направлениях имеет одинаковый период и луч проделывает все время одинаковый путь. Процесс многократно повторяется и может быть визуально наблюдаем или запечатлен на фотографической пластинке. Второе зеркало приводится в колебание соответствующей формы зубцом, укрепленным на валу мотора, причем необходимо позаботиться о том, чтобы отклонения луча света в вертикальном направлении были пропорциональны промежуткам протекавшего времени.

Принцип устройства оптического индикатора давления показан на рис. 105. Свет, идущий от дуговой лампы *A*, проходит конденсатор *B*, который проектирует изображение источника света на малое отверстие *C*; пройдя его, свет попадает на вогнутое зеркало *D*, движущееся под давлением в цилиндре паровой машины вперед и назад около оси, лежащей в плоскости чертежа. Отразившись в зеркале *D*, свет достигает зеркала *E*, наклоненного под углом в 45°, снова отражается и наконец в *F* дает точку изображения на матовом стекле или фотографической пластинке. Таким образом колебания зеркала *D* записываются на фотографической пластинке в виде прямой линии, направленной по нормали к



**106.** Фотографическая индикаторная диаграмма одноцилиндрового мотора Даймлера

плоскости чертежа; каждое отклонение луча света пропорционально действовавшему давлению; но так как зеркало $E$ колеблется вперед и назад около оси, перпендикулярной к плоскости чертежа (будучи приводимой в движение особым эксцентриком, связанным с паровой машиной), то в конечном итоге точка $F$ движется вдоль $GH$. Это движение в точности отвечает движению поршня цилиндра паровой машины.

На рис. 106 в качестве примера воспроизведена кривая, полученная вышеописанным путем. Абсциссы отвечают соответствующим положениям поршня, а ординаты — испытанным при этом поршнем давлениям. Площадь диаграммы соответствует работе поршня при его движении вперед и назад, совершенной на 1 $см^2$ поверхности поршня. Отсюда, учтя всю поверхность поршня, а также число ходов (вперед и назад) в минуту, можно вычислить мощность исследуемого мотора в лошадиных силах. Изображенная диаграмма есть индикаторная диаграмма одноцилиндрового мотора Даймлера, делающего 950 об/мин. Диаграмму сперва рассматривают на матовом стекле, а затем фотографируют ее, как только установлено, что машина работает надлежащим образом.

При фотографировании сначала закрывают отверстие $C$ (рис. 105), затем вместо матового стекла вдвигается фотографическая пластинка и коротко освещается путем открывания отверстия $C$. После этого отверстие $C$ снова закрывается, крышка кассеты вдвигается на место, и кассета удаляется; на этом съемка заканчивается. Обычно экспозиция равняется продолжительности 3—4 циркуляций. При этих циркуляциях получаются не вполне совпадающие кривые, из которых выводят среднюю.

Описанной выше аппаратурой можно пользоваться для фотографического определения изменений давления, имеющих место в



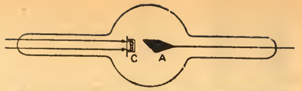

**107.** Диаграмма колебаиий давлеций. Диаграмма представляет колебация давления в трубе, вызваииые прерывистыми воздушиыми токами. *Z его* означает иулевую лииию

какой-нибудь точке, если эти изменения носят периодический характер. На рис. 107 изображена кривая, соответствующая изменениям давления в одной точке внутри трубы, через которую прерывисто засасывается воздух. Воздушное питание происходит через клапан, открываемый и закрываемый около 500 раз в минуту. Зеркало *E* апарата на рис. 105 приводится в колебание от того же самого вала, который движет клапан, но оно колеблется вдвое скорей. Поэтому свет пробегает по пластинке дважды в каждом направлении, когда между двумя последовательными открываниями клапана совершается один цикл движения. В конце диаграммы световая точка движется быстрее, чем в середине. Диаграмму можно снабдить также шкалой времени, для чего, придерживая неподвижно зеркало *D*, медленно вращают вал рукой и отмечают положения световой точки при повороте вала каждый раз на 15°. Таким образом отмеченные положения световой точки отвечают равным промежуткам времени. В изображенной на рис. 107 диаграмме, полученной фотографическим путем, можно усмотреть различные технические интересные детали.

## О рентгеновских лучах и прохождении электричества в газах

Изучение явлений, относящихся к этой области физики, в последние годы существенно продвинулось вперед, и фотография принесла здесь весьма большую пользу. Когда в трубке, наполненной находящимся под очень низким давлением газом, происходит электрический разряд между анодом *A* и катодом *C* (рис. 108), то из окружности катода испускаются лучи, состоящие из отрицательно заряженных электрических частиц, а по противоположному направлению приходят положительно заряженные частицы. Под электрически нейтральным атомом понимается атом, состоящий из очень малого центрального ядра, в котором практически сосредоточена вся основная масса атома, причем ядро заряжено положительно, а вокруг него расположены отри-

цательные электроны таким образом, что система в целом нейтральна. Вырванные из атомов электроны, т. е. отрицательно заряженные частицы образуют катодные лучи, а остаток от атома — положительно заряженная частица — фигурирует в положительных лучах. β-лучи радиактивных веществ состоят из отрицательных электротоков, α-лучи — из положительных частиц гелия. Природа электронов у всех атомов одинакова, а свойства атомов и положительных частиц определяются количеством и расположением образующихся электронов. Попадая на материю, катодные лучи вызывают флуоресценцию, сопровождающуюся повышением температуры, а затем образуются также рентгеновские или *x*-лучи. В трубке, изображенной на рис. 108, анод *A* ведет себя, как антикатод, т. е. как приемник катодных лучей. Анодом рентгеновские лучи испускаются в сторону. Установлено, что рентгеновские лучи следует рассматривать, как лучи света, длина волны которых чрезвычайно мала. Присутствие рентгеновских лучей обнаруживается по их действию на фотографическую пластинку или флуоресцирующий экран. Названные лучи проникают через различные вещества; степень проникающей способности для разных веществ различна. Это обстоятельство очень широко используется в настоящее время. В качестве важной области применения рентгеновских лучей укажем на медицину (в особенности хирургию). Рентгеновскими лучами пользуются кроме того в следующих случаях: при исследовании кусков металлов (в особенности отливок) на наличие в них дефектов, при исследовании дерева (в особенности строительного леса), при изучении и испытании картин в целях распознавания возможных подделок, при испытании ювелирных изделий, исследовании устриц на содержание в них жемчуга, для проверки пакетов в таможенной практике и т. д. и т. д.




**108.** Схематическое изображение рентгеновской трубки Кулиджа

Для визуального рассматривания результатов просвечивания рентгеновскими лучами пользуются картоном, на который нанесен слой платиносинеродистого бария, сернокислого цинка или вольфрамовокислого кальция. Такие слои флоуресцируют в тех местах, куда достигают рентгеновские лучи. Места же, покрытые материалы непрозрачной для рентгеновских лучей, образуют тени. Обычно фотографические пластинки не вполне пригодны для фотографического запечатления рентгеновского излучения по той причине, что в этом случае они требуют сравнительно продолжительной экспозиции. Не надо забывать, что только 1% рентгеновских лучей принимает участие в образовании фотографического изображения и что лучи действуют только на поверхность эмульсии. Благоприятнее оказываются соотношения при пользовании специальными пластинками, эмульсия которых очень богата солями серебра или содержит другие тяжелые металлы.



**109.** Рентгенограмма лонжероиа с самолета; иа сиимке видно, что массивиый коиец лонжерона нмеет внутри трещнны, сделанные вннтами (по Г. В. Кайе)

Наилучшие результаты в смысле сокращения времени экспозиции получаются, если флуоресцирующий экран, покрытый вольфрамовокислым кальцием, привести в тесный контакт с фотографической пластинкой. Экран флуоресцирует под влиянием х-лучей, и возникающий свет действует на пластинку. С помощью такого «устанавливающегося экрана» время экспозиции можно сократить до одной пятой времени, необходимого без такого экрана.

Для рентгеновских снимков пользуются также так называемыми «двуслойными пленками», покрытыми эмульсией с обеих сторон; такие двойные пленки гораздо удобнее обыкновенных фотографических пластинок. Усилительные экраны плотно прикладываются обычно или к передней или к задней покрытым эмульсией поверхностям. Часто пользуются сразу двумя усилительными экранами: одним спереди, другим сзади. Для „двойной пленки" Кодака рекомендуется металлогидрохиноновый проявитель. С успехом может применяться также и параминофеноловый проявитель.

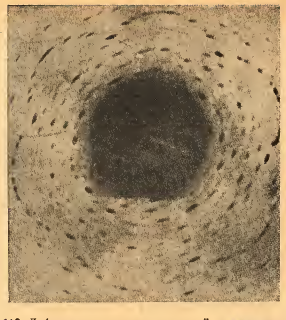
Для того чтобы получить в копии возможно больше деталей, обычно при копировании пользуются глянцевой газопечатной или бромосеребряной бумагой.

Применяя особые вспомогательные средства и пользуясь рентгеновскими трубками особого устройства, потребляющими однако очень много энергии, можно получать рентгеновские «моментальные» снимки. На рис. 108 схематически изображена трубка Кулиджа. В случае испытания металлов и твердых веществ с помощью рентгеновских лучей необходимы специальные приспособления, так как при попадании рентгеновских лучей на твердые тела возникают вторичные излучения, вуалирующие фотографическую пластинку. Обычно исследуемую пробу окружают воском и насколько возможно приближают к ней фотографическую пластинку. На рис. 109 дана рентгенограмма пустой внутри балки (лонжерона) самолета, снятой Кайе и Кнохом [1]. На снимке видно, что массивный конец лонжерона внутри разорван проходящими в нем винтами и потому негоден.

Вопрос о природе рентгеновских лучей долгое время оставался спорным; разрешение этого вопроса стало возможно с того момента, когда открыли, что рентгеновские лучи при прохождении сквозь кристалл или при отражении от его поверхности претерпевают дифракцию: именно оказалось, что равномерное, правильное расположение молекул в кристалле подобно чрезвычайно тонкой «решетке». Так как длины волн рентгеновских лучей

[1] Journ. of the Röntgen Society. 1920.

очень малы, нельзя вызвать дифракции их при помощи нормальной технически воспроизводимой решетки. Принимая во внимание, что дифракцию претерпевает только очень малая часть лучей, необходимы продолжительные экспозиции для того, чтобы на фотографической пластинке под действием рентгеновских лучей, претерпевших дифракцию, получилось видимое изображение. На рис. 110 изображена дифракция рентгеновских лучей в кристалле берилла (снимок заимствован у Брагга).

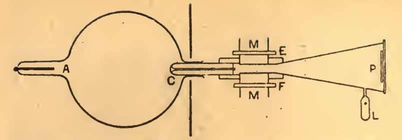


**110.** Дифракция рентгеновских лучей в кристалле берилла (по В. Х. и В. Л. Браггам).

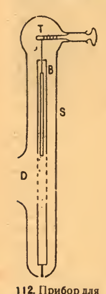
Тщательное изучение положительного излучения (каналовых лучей) очень существенно изменило наши представления о молекулярном строении материи. Названные лучи действуют как на флуоресцирующий экран, так и на фотографическую пластинку и отклоняются электрическими и магнитными полями, причем по степени этого отклонения можно судить о массе и заряде положительных частиц. Отклонение положительных лучей лучше всего констатируется путем фотографирования и последующих соответствующих промеров на фотографической пластинке.

Аппарат, которым пользуются для подобных с'емок, схематически изображен на рис. III: *A* — анод, *C* — катод; последний представляет собой металлическую трубу с очень узким отверстием, через которое может пройти очень тонкий пучок положительных лучей. Магнитные и электрические поля создаются электромагнитом *M* и электростатически заряженными пластинками *E* и *F*. Отклонившись, лучи попадают на пластинку *P* и дают на ней изображение. В пространстве между *C* и *P* должен быть создан высокий вакуум для того, чтобы при прохождении лучей через это пространство они взаимно не действовали друг на друга и не подвергались воздействию какого-либо присутствующего газа. С другой стороны, давление в трубе *AC* не должно быть слишком низким, иначе вовсе не произойдет разряда.

Перечисленные условия выполняются тем, что отверстие в катоде делается очень узким. Тогда газ может лишь очень медленно переходить в пространство вправо от *C*. Помимо того этот газ поглощается древесным углем, находящимся в оттянутом конце трубки *L*, который опущен в жидкий воздух. Положи-




111. Прибор для получения положительных (каналовых) лучей и для фотографирования их отклонения




112. Прибор для фотографической съемки положительных лучей

тельный луч, отдельные частицы которого обладают одинаковой массой вследствие того обстоятельства, что они имеют разную скорость, будет иметь форму простой параболы и в таком же виде изобразятся на фотографической пластинке. Если в луче имеются частицы с различной массой или с различным электрическим зарядом, то возникают различные, соответствующего вида параболы.

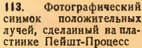
На рис. 112 схематически изображена разрядная трубка, применение которой для освещения пластинки исключает необходимость в описаных выше приспособлениях.

Разрядная трубка на одном из концов имеет форму вытянутого в длину цилиндра *S*, снабженного плоской металлической коробкой *B*; в последней может скользить фотографическая пластинка. У этой коробки около *D* (против катода) имеется спереди и сзади по отверстию. При таком устройстве положительные лучи могут попадать на виллемитовый экран, помещенный против заднего отверстия, где их можно визуально наблюдать. Виллемит — это силикат цинка минерального происхождения, который, будучи нанесен тонким слоем на стеклянную пластинку, флуоресцирует под действием положительных лучей.

Фотографическая пластинка подвешена к верхней части трубки при помощи струны, которую можно намотать на выступ *T*. Как только, глядя на виллемитовый экран, убеждаются, что вся аппаратура функционирует требуемым образом, отпускают пластинку вниз, вращая *T*. Длина пластинки достаточна для получения на ней двух или нескольких экспозиций, а размеры отверстия *D* таковы, что во время экспозиции верхней части нижняя часть пластинки закрыта. Совершенно так же, как при фотографировании рентгеновскими лучами, и в данном случае вследствие поглощающей способности желатины лучи действуют только на поверхностный, очень тонкий слой эмульсии. Поэтому полученное изображение можно легко смыть, если непроявленную пла-






**113.** Фотографический снимок положительных лучей, сделанный на пластинке Пейшт-Процесс

**114.** Фотографический снимок положительных лучей, сделанный на пластинке Шумана

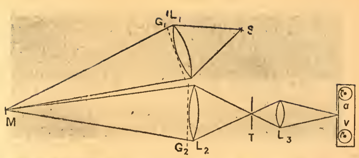
стинку погрузить в воду и протереть тонкой кистью из верблюжьей шерсти. Фотографические пластинки, предназначенные для снимков такого рода, должны обладать тонким, очень богатым серебром эмульсионным слоем. Особо чувствительные пластинки вовсе не являются наилучшими для данной цели. Аналогичные трудности обнаруживаются также и при фотографировании ультрафиолетовой спектральной области, так как желатина поглощает эти лучи. Поэтому для таких с'емок пользуются специальными пластинками. Последние, названные по их изобретателю пластинками Шумана, обладают тонким светочувствительным слоем бромистого серебра с очень малым содержанием желатины. В книге Бэли «Спектроскопия» можно найти подробное изложение способа изготовления эмульсии Шумана. И наконец можно добавить, что и на обыкновенных пластинках при фотографировании положительных (каналовых) лучей получаются хорошие результаты, если удачно подобрано время экспозиции. На рис. 113 показан такой снимок, сделанный на пластинке Пэйгит-Процесс, а на рис. 114 в тех же условиях снимок сделан на пластинке Шумана. Благодаря более мелкому зерну первая пластинка дала более резкое (богатое деталями) изображение; изображение на пластинке Шумана получило бо́льшую силу. Различная интенсивность отдельных линий не позволяет судить о числе частиц, подействовавших на пластинку, так как различного рода частицы различно сильно действуют на пластинку; число



**115. Пути α-лучей. Фотографический снимок Уильсона**

частиц в отдельных лучах можно определить только путем электрических измерений.

Испускаемые радиоактивными веществами α- и β-лучи, затем катодные лучи, положительные лучи, а также x-лучи рентгеновской трубки обладают свойством ионизировать газ, через который они проходят, т. е. вырывать один из многих отрицательных электронов тех атомов или молекул, мимо которых они проходят. Этим свойством пользуются, чтобы отметить путь лучей и фотографически запечатлеть его. Когда газ сначала насыщен водяным паром, а затем охлажден, то часть водяных паров осаждается на мельчайших присутствующих в газе частицах пыли, если же все частицы пыли удалены из газа, то вода осаждается на электронах или, вернее, на образующихся ионах. Уильсону удалось подсчитать количество образующихся капелек воды и таким образом установить приблизительное число ионов в определенном об'еме. Если пучок x-лучей или радиоактивных лучей проходит через некоторый об'ем насыщенного водяным паром газа, причем последний не был до этого ионизирован и не содержит частичек пыли, то под действием лучей образуются ионы, которые отмечают водяными капельками путь лучей. Такие пути лучей можно зафиксировать фотографически. Снимки делаются при свете искры одним из описанных в начале этой главы способов. Охлаждение газа достигается быстрым увеличением об'ема заполненного газом пространства, в результате чего газ расширяется. Если дело сводится к фотографированию излучения радиоактивных веществ, то затвор камеры можно приводить в движение (спускать) при помощи того же самого механизма, который обусловливает расширение заполненного газом пространства,




**116.** Аппаратура для записи и воспроизведения звука по А. О. Ранкину

причем надо так приспособить затвор, чтобы сейчас же после расширения вместилища лучи быстро проходили через газ. Только что упомянутый механизм непосредственно связан с тяжелым шаром, проходящим через искровой промежуток электрической цепи (с включенным конденсатором). При замыкании цепи, во втором искровом промежутке вызывается яркий искровой разряд, происходящий сейчас же после прохождения лучей. Образующиеся водяные капельки фотографически фиксируются при свете искрового разряда. Если ионизация газа должна быть произведена $x$-лучами, то при помощи падающего шара замыкают ток в цепи, который образует моментальный разряд в рентгеновской трубке; после этого шар замыкает вторую цепь, в результате чего возникает свет. На рис. 115 воспроиведены водяные капельки на ионах, образованных $\alpha$-лучами радия[1]. Снимок сделан беккеровским изостигмаром 1 : 3,5 при полном отверстии на пластинке Ilford-Monarch.

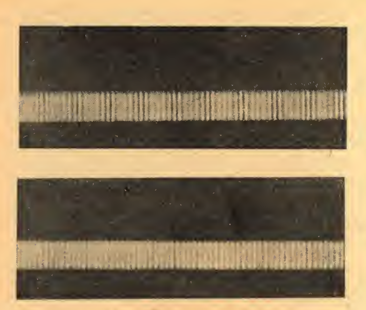
## Другие различные применения фотографии в физике

Кроме уже описанных нами примеров применения фотографии в физике можно привести еще много других, в которых описанные методы применяются в том или ином видоизменении.

Если нужно регистрировать температурные колебания печи или какого-нибудь иного тела, удобнее всего пользоваться платиновым термометром сопротивления. При этом собственно регистрирующим инструментом является гальванометр, отклонения которого пропорциональны температуре и могут фотографически регистрироваться на бумажной или пленочной ленте. Запись телефонных токов уже упоминалась нами раньше при измерении звука. Метод записи звука принадлежит Ранкину[2]. Этот метод принципиально отличается от описанных ранее и служит для записи и передачи звуков непосредственно или с помощью киноленты.

Установка, примененная в опытах Ранкина, схематически изображена на рис. 116. Лучи точечного источника света $S$ собира-

[1] Proc. Roy. Soc. vol. A. 87.
[2] Proc. Phys. Sos., 32.



**117.** Фотографическая регистрация гласной *а* при произнесении ее перед фонографом: вверху при высоте звука, равной 135, а внизу—205 колебаниям в секунду

ются линзой $L_1$ в некоторой точке поверхности вогнутого зеркала *M*, соединенного с мембраной фонографа и движущегося соответственно колебаниям последней. Лучи света отражаются от зеркала *M*, затем проходят через линзу $L_2$ и собираются ею в месте щели *T*. Линза $L_3$ проектирует изображение освещенной щели на киноленту, проходящую по вальцам *a* и *v*. Перед конденсорными линзами $L_1$ и $L_2$ помещены решетки $G_1$ и $G_2$ — это металлические пластинки, в которых вырезаны параллельные полоски одинаковой ширины. Расстояние этих решеток от зеркала *M* равно радиусу кривизны последнего, так что изображение $G_1$ проектируется в $G_2$. Когда зеркало *M* в покое, то изображение щелей решетки $G_1$ совпадают с щелями решетки $G_2$, весь упавший на *M* свет пропускается решеткой $G_2$ и собирается в *T*. Когда же *M* колеблется (под действием звука на мембрану), то и изображение решетки $G_1$ приходит в колебание, и количество света, пропущенного решеткой $G_2$, зависит от того, в какой мере изображения щелей решетки $G_1$ перекрывают щели решетки $G_2$. Освещенность, проникающая через *T*, в результате этого сильно меняется, следствием чего должны быть соответствующие изменения плотностей (почернений) изображения на светочувствительной пленке. Практически оказалось наиболее удобным совмещать изображения краев щелей решетки $G_1$ со срединами щелей или же полосок решетки $G_2$. При таком расположении при неподвижном положении зеркала только половина всего достигающего *M* света будет пропущена решеткой $G_2$. Если теперь мембрана фонографа начнет колебаться, а зеркало двигаться, это

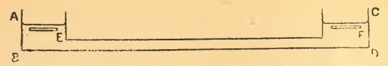
скажется в изображении увеличением или уменьшением количества света, в то время как при прежнем расположении частей колебания зеркала всегда приводили бы только к уменьшению количества света, приходящего в *T*.

Расположение, описанное во втором случае, имеет то преимущество, что при нем не так ясно заметна неравномерность края щелей или их недостаточная параллельность.

Характер изменения интенсивностей обусловлен природой звука, вызывающего колебания мембраны фонографа, а с ней и зеркала *M*. Можно надеяться, что подобные регистрационные снимки, т. е. их изучение, дадут ценные данные для суждения о природе звуков речи. На рис. 117 изображены две простые записи вышеописанного типа. Это — фотографическая регистрация гласной «а» (произнесенной в фонограф), сначала при высоте звука, равной 135 колебаниям в секунду, и затем при высоте в 205 колебаний в секунду. Пленка при этом движется со скоростью, немного превышающей один метр в секунду. На рисунке заметно, что в звуковой записи основное колебание с меньшей высотой звука состоит из линий, отстоящих друг от друга приблизительно на 8 *мм* и значительно более интенсивных по сравнению с прочими. В записи, отвечающей бо́льшему числу колебаний, влияние основного колебания сказывается слабее. Фотографическая регистрация целых слов гораздо сложнее, чем запись отдельных гласных.

Сделанные описанным выше способом звуковые записи могут быть использованы также для воспроизведения тех же самых звуков, которыми они были вызваны. В основном процесс слагается из следующего: на ранее полученную ленту проектируют изображение щели; свет проходит сквозь пленку и падает на селеновую ячейку, включенную в электрическую цепь. Если привести ленту в движение, то интенсивность света, пропущенного различными местами ленты, будет изменяться в зависимости от имеющихся на этих местах почернений (плотностей), т. е. она обратно пропорциональна первоначально падавшему на пленку количеству света. Свет, достигающий селеновой ячейки, меняет электрическое сопротивление последней и тем самым силу идущего через нее электрического тока. Если в цепь включить телефон (приемник), то колебания тока воспроизведут в телефоне первоначальный тон.

В заключение упомянем новую область применения фотографии на службе физики. А. Майкельсон (см. Proc. Phys. Soc., 33) воспользовался фотографическими изображениями интерференционных полосок, образующихся вследствие отражения на разграничительных поверхностях тонкого слоя, для определения толщины этого слоя. Он основывается на этой проблеме в своем недавнем определении степени твердости земли. Прибор, посредством которого производилось это определение, изображен на рис. 118. *V*-образная труба *ABCD* наполняется водой и зарывается в землю с тем, чтобы она минимально подвергалась температурным колебаниям; при этом труба направлена к поверхности земли по касательной в точке, в которой она закреплена, а поверхность




118. Аппарат для измерения твердости земли (по А. А. Майкельсону)

воды всегда перпендикулярна к линии, соединяющей точку укрепления аппарата с центром земли.

*E* и *F* — две плоскопараллельных пластинки из оптического стекла, закрепленные неподвижно относительно аппарата. Высота уровня воды над обеими пластинками меняется, т. е. она увеличивается над одним и убывает над другим (и наоборот) при периодических изменениях в земной коре. Измерение меняющейся подобным образом толщины водяного слоя над обеими пластинками поведет к определению смещения земной коры относительно линии, соединяющей точку на поверхности земли с центром земли. Интерференционные полоски фотографируются на протяжении года на медленно и непрерывно движущейся пленочной ленте. Изменения формы земли выражаются при этом в виде смещений интерференционных полосок. На основании проведенных измерений оказалось, что земля обладает твердостью, соответствующей твердости стали.

## Литература

Исчерпывающего труда по применению фотографии в физике не существует, можно найти только сравнительно скудные указания на различные фотографические методы в отдельных журналах и книгах.

6 ГЛАВА

# ФОТОГРАФИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ

ДЖОН ГЕНРИ Ж. Г. МОНАППЕННИ

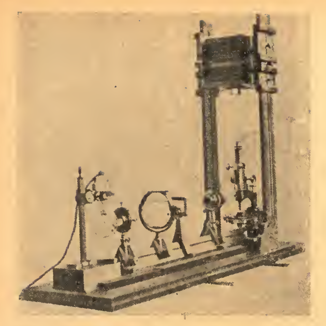
На протяжении последних 25 лет фотография приобрела все возрастающее значение в металлургии. Прежде всего свое применение фотография нашла в металографии, т. е. микрофотографии металлических шлифов, в настоящее время очень распространенный метод исследования металлов. Сейчас вероятно найдется мало лабораторий в машиностроительных и металлургических предприятиях, не располагающих никакими микрофотографическими установками. В дальнейшем изложении в первую очередь мы опишем микрофотографические методы, применяемые в металлургии, а в конце статьи будут изложены также и другие фотографические методы, которые могут быть с пользой применены в металлургии.

## Микрофотография

Мы исходим из предположения, что читатель, имеющий в виду воспользоваться микрофотографией для исследования металлов, знаком в основном с металлографическим микроскопом; несмотря на это, считаем нужным несколько подробнее остановиться на некоторых важных свойствах металлографического микроскопа и указать на особенности этого прибора, которые необходимо знать для выполнения микрофотографических работ.

Ввиду того что исследуемые шлифы металлов непрозрачны, создалась необходимость в особых осветительных приспособлениях, отличающихся от применяемых в обычной микроскопии, в которой большей частью исследуются прозрачные препараты. Так как свет, нужный для рассматривания поверхности среза, должен отражаться от поверхности шлифа, необходимо пользоваться вертикальным осветителем.

Предметный столик должен быть снабжен грубым установочным приспособлением для предотвращения ухудшения освещения об’-



**119.** Микрофотографическая установка (по Дж. Монайпенни)

екта при движении тубуса микроскопа. В движущейся части предметного столика область фокусировки должна быть достаточно широка, в особенности при микрофотографической работе. Это необходимо, с одной стороны, для того, чтобы иметь возможность различно глубоко проникать при рассматривании исследуемых проб, а с другой — также для осуществления нужных перемещений об'екта, необходимых при переходе от одного увеличения к другому. Тубус микроскопа должен иметь большой диаметр, чтобы при получении микрофотограмм при небольшом увеличении можно было воспользоваться вертикальным осветителем больших размеров.

Этого обстоятельства мы подробнее коснемся несколько позже. В миркофотографии важнейшим предварительным условием является отсутствие вибраций во всей аппаратуре или по крайней мере, чтобы во время работы отдельные части установки не претерпевали никакого смещения относительно друг друга. Последнее условие лучше всего реализовать тем, что отдельные части аппаратуры, как-то: камеру, микроскоп и осветительную систему, жестко монтировать на общем прочном основании (доске). Если же камера и микроскоп покоятся на раздельных основаниях (столах), как в одной из последних микрофотографических установок, то в таком случае предполагается, что пол рабочего помещения очень солиден.

Металлографический микроскоп, которым автор пользовался для микрофотографических целей, изображен на рис. 119. В этом микроскопе тубус и камера расположены вертикально. Такое рас-

положение частей следует, по мнению автора, предпочесть при металлографических работах горизонтальному положению, обычно применяющемуся при работе с прозрачными препаратами. При вертикально монтированной установке легко производить наблюдение и с'емку больших и тяжелых об'ектов, часто встречающихся в практике металлургической техники, просто путем заключения этих об'ектов в пластилин; если предметный столик и камера поставлены горизонтально, об'екты должны быть заключены в более твердое вещество (сургуч или подобные вещества), чтобы помешать их сползанию. В последнем случае пружины, удерживающие предметное стекло, должны быть очень тугими, чтобы они могли противостоять сползанию всего предметного стекла.

Но, с другой стороны, при вертикальном положении не исключена опасность некоторого сдвига тубуса во время экспозиции, в особенности, когда его установочные винты несколько расшатаны. Последнее сопряжено с трудностями только в случае сильных увеличений и практически устраняется тем, что при наводке к окончательному положению приходят не путем опускания, а путем поднятия об'ектива.

Можно привести еще одно основание, почему вертикальная установка устраивает больше: при нормальном положении наблюдения легче помещать об'ект под микроскоп и регулировать освещение в микроскоп, чем когда приходится судить по изображению, спроектированному на вертикальном экране.

При вертикальном размещении (рис. 119) камера просто передвигается вверх по направляющим планкам аппарата, и остается достаточно свободного места для головы наблюдателя. При горизонтальном расположении опорная доска обычно мешает и наблюдению: приходится сильно повертывать шею, если только микроскоп и осветитель не монтированы на особом поворачивающемся диске, позволяющем легко отводить обе эти части вбок от оси камеры. Подобными установками пользуются часто в микроскопах, которыми фотографируют прозрачные об'екты, но для металлографических работ они очень неудобны, так как конденсорная система расположена у них обычно под прямым углом к оси микроскопа.

Для микрофотографической камеры наиболее подходит пластинка $13 \times 18$ *см*. Во многих случаях можно обойтись также и форматом $9 \times 12$ *см*, но обычно бо̀льший формат удобнее даже при слабых увеличениях. Предпочтительнее пользоваться кассетами бо̀льшего размера со вкладышами для пластинок меньшего формата.

Растяжение камеры должно равняться 50—75 *см;* вообще же говоря, редко приходится давать растяжение больше 50 *см*, исключая случай более слабых увеличений, когда используется только об'ектив (без окуляра). В последнем случае приходится пользоваться растяжениями и бо̀льшими, чем 50 *см*. При пользовании например 35-*мм* об'ективом при 20-кратном увеличении растяжение меха должно равняться приблизительно 70 *см*, из которых на тубус микроскопа падает около 10—12,5 *см*.

## Об'ективы

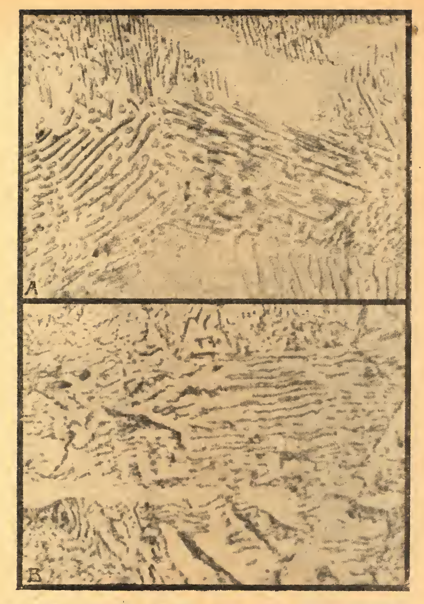
Наиболее употребительные для металлографических целей об'ективы имеют длину фокусного расстояния в 24 (или 16) *мм* и в 4 *мм*. Первые делаются с апертурой N.A.[1], равной 0,25—0,30, и применяются для увеличения в 50—150 раз, а последние имеют N.A. — от 0,8 до 0,9 и используются для увеличения в 400—750 или даже в 1 000 раз. Вторым об'ективом можно обойтись при большинстве металлографических работ. Если желательно разрешение, большее даваемого 4-*мм* об'ективом, берут систему с 2—3-*мм* фокусным расстоянием. Это — система с масляной иммерсией и N.A. =1,3—1,4. Часто при грубом строении препарата поле зрения 24- или 16-*мм* об'ектива бывает недостаточно; в этих случаях пользуются об'ективом с 40—50-*мм* фокусным расстоянием. Увеличения приблизительно в 25 раз лучше всего достигаются специальными короткофокусными об'ективами, пользование которыми будет более подробно описано ниже. Часто бывают полезны об'ективы с фокусным расстоянием в 12 или 8 *мм* и N.A. =0,6. Например, когда требуется фотографировать тонкое металлическое строение или металлические срезы при 250-кратном увеличении.

Нередко указывали на трудности, связанные с пользованием об'ективами с фокусным расстоянием в 4 *мм*[2].

Утверждали, что при работе с такой оптической системой достигается очень малое свободное расстояние и что в фронтальной линзе об'ектива имеет место большое отражение света и поэтому получается так много «ложного света», что вообще нельзя добиться достаточно контрастной фотограммы; поэтому предлагалась специальная масляная иммерсионная система с фокусным расстоянием в 4 *мм*. Автор настоящей статьи отмечает, что в его практике ему никогда не приходилось сталкиваться с упомянутыми выше трудностями. Он пользовался 4-*мм* об'ективами различной численной апертуры при различных свободных расстояниях, в том числе 4-*мм* апохроматом Цейсса (допускающим свободное расстояние до 0,2 *мм*), а также системой об'ектива с более низкой апертурой и большим свободным расстоянием (так называемым «парахроматом» с фокусным расстоянием около 4 *мм*, N.A. =0,74 и свободным расстоянием в 1 *мм*, построенным Уатсоном в Лондоне), и ему никогда не приходилось преодолевать никаких затруднений при получении контрастных фотографических снимков. Автор считает возможным утверждать, что при нормальных лабораторных работах, в которых 24-*мм* об'ектив часто приходится сменять на 4-*мм*, пользование масляной иммерсионной системой должно быть признано достаточно неудобным.

Все об'ективы по характеру исправления ошибок можно разбить на три группы: а) ахроматические, б) полуахроматические и в) апохроматические об'ективы.

[1] N. A. означает „числовую апертуру".
[2] H. M. Sayers, Освещение при микрофотографической с'емке металлов, Frans Farady Sos. 19, 172.




**120.** Микрофотограммы: *A*—перлит и феррит; об'ектив—апохромат Цейсса, длина фокуса 2 *мм*, $A = 1{,}4$ при монохроматическом синем свете, *B*—перлит, более тонкий, чем в *A*; об'ектив — холоскоп Уатсона, длина фокуса 2 *мм*, $A = 1{,}35$ при желто-зеленом свете

Микрофотограмма *A* была первоначально получена при увеличении в 1000 раз. Микрофотограмма *B* — в 1400 раз, а затем в обоих негативах увеличение было доведено до 3000 раз.

*В ахроматических* об'ективах, встречающихся чаще всего, сферическая аберрация до известной степени исправлена только в отношении лучей одной какой-либо длины волны — обычно для лучей желто-зеленой спектральной области. Такие об'ективы страдают большой фокусной разностью для желто-зеленых, красных и синих лучей.

Этими об'ективами следует пользоваться всегда в комбинации с желтым или зеленым фильтром и ортохроматической пластинкой, так как последняя менее чувствительна к синему и сине-фиолетовому свету.

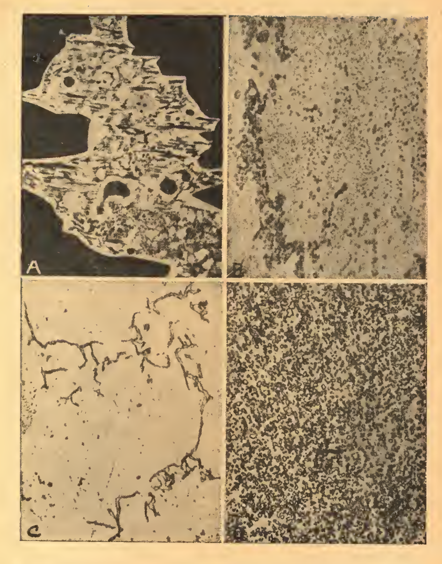
*Полуапохроматические* об'ективы относятся к ахроматическим системам; исправление отдельных ошибок проведено у них значительно полнее, чем у ахроматических об'ективов. Так же как и у ахроматов, сферическая аберрация устранена только для лучей одной длины волны (обычно для длины волны желто-зеленой спектральной области), хотя и в более совершенной степени, почему эти об'ективы лучше всего работают при данной длине волны.

*В апохроматических об'ективах* сферические аберрации в грубом приближении устранены для в с е х цветов, причем и хроматические разности сферических отклонений сведены до минимума. Эти системы линз построены значительно сложнее предыдущих и вследствие этого расцениваются дороже.

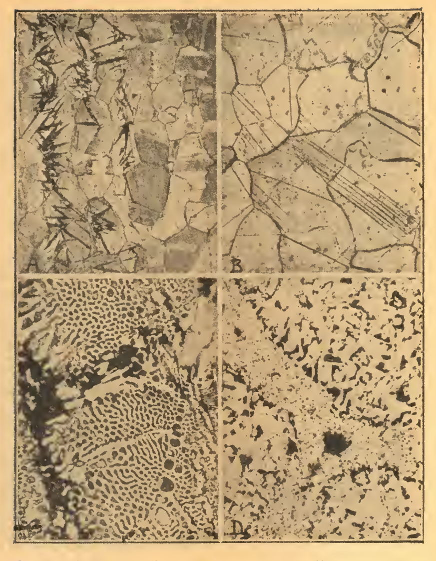
В тех случаях, когда желательно получить в снимке большее разрешение, прибегают к системе с масляной иммерсией. Автор рекомендует для этих целей апохромат с длиной фокусного расстояния 2—3 *мм*. В связи с этим следует напомнить, что разрешающая способность об'ектива зависит как от длины волны примененного света, так и от N.A. об'ектива. Если при прочих равных условиях вместо света с длиной волны 5 500 Å применить свет с длиной волны 4 500 Å, то достигается такой же эфект, как если бы N.A. об'ектива было увеличено на 25%. Отсюда следует, что разрешающая способность апохромата при пользовании сине-фиолетовым светом значительно превосходит разрешающую способность полуапохромата при желто-зеленом свете.

На рис. 120 *A* и *B* — микрофотограммы при 3 000-кратном увеличении, сделанные цейссовским 2-*мм* апохроматом и об'ективом-холоскопом Уатсона с таким же фокусным расстоянием. Можно заметить, что ни один из обоих об'ективов по резкости даваемого изображения не уступает другому.

При пользовании об'ективом с фокусным расстоянием в 4 *мм* лучше всего остановить свой выбор на апохромате, хотя хорошие результаты могут получиться и с хорошим полуапохроматом. При об'ективах с фокусным расстоянием в 10 и в 24 *мм* не приходится много выбирать между апохроматом и полуапохроматом; при работе с последним необходимо желто-зеленое освещение. (Это освещение очень подходит для металлических шлифов.) При пользовании полуахроматом необходимо работать на ортохроматических пластинках, а также со светофильтром, что связано с удлинением времени экспозиции. Кроме того освеще-




**121.** Микрофотограммы: $A$—$\alpha$—$\beta$—эвтектика в пушечном металле; $V = 750\times$, об'ектив—апохромат Цейсса, длина фокуса—4 *мм*, *N.A.*=0,95; репродукционная пластинка без фильтра.
$B$—высококачественная сталь, травленная пикратом калия; $V = 750\times$, об'ектив — холоскоп Уатсона, длина фокуса—4 *мм*, *N. A.* = 0,95, пластинка Allochrom, зеленый фильтр.
$C$—карбид в прокаленной мягкой стали; $V = 750\times$, об'ектив Росса (ахромат), длина фокуса — 4 *мм*, пластинка Allochrom, зеленый фильтр.
$D$—перлит в шариках; $V = 500\times$, об'ектив—холоскоп Уатсона, длина фокуса—12 *мм*, *N.A.* = 0,65, пластинка Allochrom, зеленый фильтр.




122. Микрофотограммы: $A$ — аустенит и мартенсит; $V = 100\times$, об'ектив — апохромат Цейсса, длина фокуса — 24 *мм*, $N.A. = 0{,}3$; репродукционная пластинка без фильтра.
$B$ — нейманнская полоска (силикат железа); $V = 100\times$, об'ектив—холоскоп Уатсона, длина фокуса — 24 *мм*, $N.A. = 0{,}24$; пластинка Allochrom, зеленый фильтр.
$C$ — яркая эвтектика железа; $V = 300\times$, об'ектив — холоскоп Уатсона, длина фокуса—12 *мм*, $N.A. = 0{,}65$; пластинка Allochrom, зеленый фильтр.
$D$ — место сварки мягкой стали; $V = 100\times$, об'ектив Свифта, длина фокуса—25 *мм*, $A = 0{,}25$, пластинка Allochrom, зеленый фильтр.

ние темной комнаты должно быть соответственно и очень тщательно подогнано к этому сорту пластинок.

Ниже мы приводим несколько характерных микрофотограмм, полученных различными об'ективами. На рис. 121 (*B* и *C*) видно, какой резкости можно достигнуть с помощью полуапохроматов и апохроматов при 750-кратном увеличении. Эти рисунки можно сравнить с рис. 121, где *A*, представляет микрофотограмму, полученную цейссовским апохроматом при том же увеличении.

Рис. 121 (*D*) и 122 (*C*) изображают микрофотограмму, полученную об'ективом с фокусным расстоянием в 12 *мм*, а рис. 122 (*A*, *B*, *D*) показывает, что более слабые полуапохроматы при некоторых обстоятельствах могут давать результаты, мало отличающиеся от достижимого апохроматами.

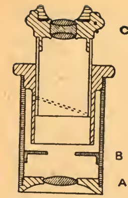
По сравнению с апохроматами ахроматы (в особенности более слабые) имеют то преимущество, что обладают п л о с к и м полем изображения. Получаемое с помощью об'ектива микроскопа изображение у всех об'ективов более или менее искривлено; поэтому при наводке на средние части поля изображения его внешние части окажутся нерезкими, и наоборот. Это искривление поля изображения особенно заметно у апохроматов, у которых вполне резко может быть изображена только небольшая часть поля зрения, лежащая посредине его.

Поперечник поля (изображения), проектируемый с равномерной резкостью, обычно равен около 70 *мм*, принимая во внимание, что спроектированное об'ективом изображение в 8—10 раз увеличивается окуляром. Некоторые ахроматы, главным образом более слабые системы линз, приблизительно с фокусным расстоянием в 16 и 24 *мм*, обладают довольно большой и плоской поверхностью изображения, и потому с ними можно получать хорошие результаты.

Все апохроматы, а также большинство других об'ективов микроскопов рассчитаны на работу при совершенно определенной длине тубуса; она равна 160 или 250 *мм* и обязательно должна соблюдаться, если хотят получить хорошие результаты. К этому надо добавить, что тубусы некоторых микроскопов нельзя построить короче 140 *мм*. Когда об'ектив, рассчитанный для тубуса в 160 *мм*, применяется при длине тубуса в 140 *мм*, возможно использование только очень малого вертикального осветителя, поэтому в металлографии целесообразнее всего пользоваться длинными тубусами.

## Окуляры

Хотя окуляры микроскопов, предназначенных для визуального наблюдения, могут быть использованы также и в микрофотографии, все же для этих целей лучше пользоваться так называемыми п р о е к ц и о н н ы м и о к у л я р а м и. Это — окуляры, специально предназначенные для проекционных целей. Они обычно изготовляются двух величин: более слабые с 3-кратным увеличением для тубуса в 250 *мм* (с 6-кратным увеличением для тубуса в 160 *мм*) и более сильные с 6-кратным увеличением для тубуса в




**123. Схематический эскиз проекционного окуляра (разрез)**

250 *мм.* Конструкция проекционного окуляра схематически изображена на рис. 123. Об'ектив микроскопа совместно с линзой *A* окуляра дает в плоскости *B* изображение снимаемого об'екта. Это изображение проектируется на светочувствительную пластинку обращенной к глазу линзой *C*, склеенной из нескольких стекол (с увеличением около 8 раз). Ввиду того что проектируемое об'ективом изображение должно лежать в плоскости диафрагмы *B*, линзу *C* нужно передвигать относительно *B*, когда меняется длина растяжения камеры, так как между расстоянием *BC* и длиной растяжения камеры имеется закономерная зависимость (уравнение линз). Поэтому линза *C* монтирована в подвижном тубусе, любое положение которого может быть прочтено на шкале. Для каждого избранного растяжения камеры нужно передвигать *C* до тех пор, пока на матовом стекле не появится резкое изображение диафрагмы *B*. Так как положение линзы *C* зависит только от величины растяжения камеры и потому каждый раз должно быть изменено, можно пользоваться соответствующей таблицей или номограммой, по которым для каждого растяжения камеры можно вычислить соответствующее положение линзы *C*.

Проекционные об'ективы дают очень хорошее, резкое изображение, но имеют относительно малое поле изображения. Несколько большее поле изображения получается при пользовании более слабыми об'ективами, в особенности ахроматами и полуапохроматами, соединенным с обыкновенным окуляром Гюйгенса.

Следует отметить, что пользование окуляром Гюйгенса (или каким-нибудь компенсационным окуляром) для проектирования изображения на фотографическую пластинку связано с уменьшением эфективной оптической длины тубуса микроскопа, меняющейся в известных пределах в зависимости от окуляра и могущей достигать 10—20 *мм.* При нормальном пользовании окуляром для визуального рассматривания изображения даваемого об'ективом, линза, обращенная к глазу, дает увеличенное м н и м о е изображение действительного изображения, проектируемого об'ективом в плоскость диафрагмы окуляра (действительное промежуточное изображение). В этом случае линза, обращенная к глазу, и изображение, проектируемое об'ективом, должны находиться ближе друг к другу, чем в том случае, когда даваемое об'ективом изображение (т. е. действительное промежуточное изображение) должно быть спроектировано линзой окуляра, обычно обращенной к глазу, в плоскости матового стекла камеры. Так как в обыкновенном окуляре обращенная к глазу линза и плоскость диафрагмы находятся друг от друга на неизменном расстоянии, даваемое об'ективом изображение должно возникать на бо́льшем расстоянии от линзы, обращенной к гла-




**124.** Влияние толщины плоскопараллельного стекла вертикального осветителя на резкость микрофотограммы при пользовании слабым об'ективом микроскопа. Перлит в шариках, $V = 200 \times$, об'ектив—апохромат Цейсса, длина фокуса — 24 *мм*, *N.A.* = 0,30; монохроматический синий свет.

*A* — тонкое плоскопараллельное стекло (0,1 *мм*).

*B* — толстое плоскопараллельное стекло (0,5 *мм*)

зу (т. е. ближе к об'ективу), чем расстояние от названной линзы до плоскости диафрагмы. При пользовании обыкновенным окуляром Гюйгенса, дающим 7-кратное увеличение, с тубусом в 250 *мм* уменьшение оптической длины тубуса составляет около 10 *мм* при растяжении камеры в 400 *мм*. Такое укорочение длины тубуса не имеет существенного значения при слабом ахромате, но может стать очень ощутительным при сильном апохромате. Обыкновенный окуляр микроскопа исправлен для визуального пользования (в особенности исправлена сферическая аберрация); поэтому проектируемое таким об'ективом действительное изображение естественно должно страдать определенными недостатками.

## Вертикальный осветитель

Имеются две системы вертикальных осветителей: 1) плоскопараллельная стеклянная пластинка по Бекку и 2) призма по Наше. Специально для сильных увеличений автор рекомендует плоское стекло. Правда, в некоторых конструкциях вертикальных осветителей (в непрозрачных осветителях) применяемая стеклянная пластинка слишком толста и потому влияет на качество проектируемого об'ективом изображения. На изображениях, проектируемых слабыми об'ективами (с фокусным расстоянием в 12—25 *мм*) с большой нижней линзой, при которой участвует значительная часть стеклянной пластины осветителя, большая толщина этой пластинки сказывается сильнее, чем на изображениях, проектируемых сильными об'ективными линзами с фокусным расстоянием в 4 или 2 *мм*.

Как ведет себя плоскопараллельный осветитель в соединении со слабым об'ективом, видно из рис. 124 *A* и *B*. Оба снимка сделаны в одинаковых условиях; в снимке рис. 124 *A* применена стеклянная пластинка толщиной 0,1 *мм*, в снимке рис. 124 *B* толщина примененной пластинки равнялась 0,5 *мм*. В качестве более тонкой стеклянной пластинки было взято покровное стекло № 1, а более толстая представляла собой плоскопараллельную шлифованную, оптически обработанную стеклянную пластинку. Заметно, что при пользовании толстой стеклянной пластинкой резкость изображения сильно падает. В соединении с 4-*мм* апохроматом Цейса и при 750-кратном увеличении толстой пластинкой можно было пользоваться так же хорошо, как и тонкой, т. е. она не ухудшала значительно качества изображения.

Ввиду большой распространенности мнения, что толстая плоскопараллельная стеклянная пластинка всегда дает хорошие результаты в качестве осветителя, следует особенно подчеркнуть, что толстая стеклянная пластинка в соединении со слабыми об'ективами сильно ухудшает качество изображения. Упомянутое выше распространенное, но неправильное утверждение можно отчасти об'яснить тем, что толстое плоскопараллельное стекло в соединении с сильными об'ективами действительно дает хорошие результаты.

Вертикальный осветитель должен быть снабжен ирисовой диафрагмой, которая, так же как и плоскопараллельное стекло, дол-

жна быть достаточно велика из тех соображений, чтобы нижняя линза всякого об'ектива была полностью освещена; для этого в большинстве случаев достаточно, чтобы отверстие ирисовой диафрагмы было около 11 *мм* в диаметре. Ирисовая диафрагма должна быть снабжена точно работающим приспособлением для центрирования и должна передвигаться в направлении, перпендикулярном оптической оси. Основным условием должно быть не слишком толстое плоскопараллельное стекло вертикального осветителя.

Осветители с плоскопараллельными стеклами, в особенности в соединении с более слабыми об'ективами микроскопов, дают в изображении некоторые нежелательные явления (ложный свет, вуаль), возникающие вследствие отражения света от обращенной к окуляру поверхности нижней линзы об'ектива. Этот отраженный свет при некоторых обстоятельствах попадает в окуляр. Конечно при прочих одинаковых условиях количество отраженного и в конечном итоге попадающего в окуляр света зависит от радиуса кривизны обращенной к окуляру поверхности нижней линзы об'ектива: чем сильнее кривизна этой поверхности, тем больше света достигает внутренней поверхности тубуса и там поглощается. Так как у большинства ахроматов кривизна нижней линзы сильная, то большая часть отраженного света попадает на стенки тубуса и поглощается его вычерненной внутренней поверхностью. В отличие от этого нижняя линза апохроматов большей частью делается плоской, и потому в изображении должна возникать более сильная вуаль. Образование такой вуали должно конечно повлечь за собой снижение контрастов изображения — явление, описанное автором в одном из прежних сообщений и впоследствии подробно исследованное [1].

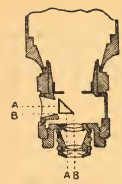
Призменный вертикальный осветитель дает — это можно утверждать — более яркие изображения, чем вертикальный осветитель с плоским стеклом, поэтому многие металлурги предпочитают первый, в особенности при малых увеличениях, часто это зависит также и от того, что иногда пользуются неподходящими осветителями со стеклянной пластинкой.

Об уменьшении резкости изображения и разрешающей способности микроскопа при пользовании призменными вертикальными осветителями, в особенности же в комбинации с сильными об'ективами, было так часто и подробно говорено, что мы воздержимся от разбора этого явления. При малых увеличениях недостатки, зависящие от призменного вертикального осветителя, сказываются не так сильно. Поэтому призма получила широкое распространение, и с помощью ее можно получить богатые контрастами изображения; причина этого кроется также в том, что при пользовании призмой не образуется вуали, возникающей в изображении при работе со стеклянной пластинкой.

С другой стороны, при слабых увеличениях в пользовании призмой возникают большие затруднения в тех случаях, когда нужно равномерно осветить большое поле зрения. Принимая во внима-

---

1 Frans.' Farad, Soc. 16 № 145




125. Положение оси ирисовой диафрагмы в призменном вертикальном осветителе

ние эти обстоятельства, автор во всех случаях предпочитает плоскопараллельный осветитель, а призмой пользуется очень редко.
Замечательно, что у большинства встречающихся в продаже типов призменных осветителей центр ирисовой диафрагмы большей частью помещен против середины наружной поверхности призмы и потому ограничивает круг, центр которого лежит миллиметра на 3 вбок от оси об'ектива микроскопа. Правильно же ирисовая диафрагма должна быть расположена таким образом, чтобы ее середина лежала отвесно над гранью основания призмы. Эти соотношения изображены на рис. 125: здесь *A* означает ось (симметрии) ирисовой диафрагмы, так как она обыкновенно расположена в осветителях, а *B* изображает, где эта линия должна проходит через центр диафрагмы.
Один из недостатков вертикального призменного осветителя заключается в том, что свет падает на об'ект немного косо — явление, заметное очень ясно при расположении оси ирисовой диафрагмы по фону *A*.

## Источники света и осветительные установки

После самого микроскопа существенное значение в микрофотографической аппаратуре принадлежит источнику света и осветительной установке. Для получения безукоризненного микрофотографического снимка требуется выполнение следующих условий: 1) все изображаемое поле зрения должно быть равномерно освещено; 2) вся нижняя линза об'ектива должна быть заполнена равномерно ярким пучком света; 3) длина волны примененного света должна быть как раз той, для которой об'ектив микроскопа исправлен.
Иногда могут встретиться случаи, когда цвет фотографически передаваемого металлического шлифа требует освещения определенной окраски; случаи эти очень редки и более подробно будут рассмотрены в отделе светофильтров.
500-свечовую точечную лампу (например вольфрамовую дуговую лампу Edison Swan Electric Co или точечную лампу Osram) автор предпочитает всякому иному источнику света.
Свет такой лампы очень интенсивен и постоянен. Лампа питается постоянным током (в последнее время в продаже появился тип таких ламп, построенных для переменного тока). Обыкновенная дуговая лампа в состоянии дать значительно бо́льшие яркости, но страдает тем недостатком, что светит неравномерно, в особенности при питании ее переменным током. Долгое время автор пользовался друммондовым светом и предпочитал его и дуговой лампе и лампе Нернста. Друммондов свет не очень интенсивен, но зато горит спокойно и с равномерной яркостью. Для средних и малых увеличений он вполне пригоден, но при очень сильных

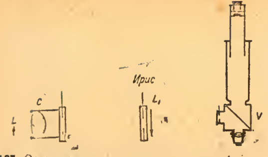
увеличениях для с‘емки темных металлических шлифов при этом освещенни нужны сравнительно продолжительные экспозиции (при этом возникает опасность сотрясения аппарата); кроме того в этих случаях вследствие малой яркости очень затруднителен процесс наводки.

126. Схематический эскиз расположения источника света в металлографическом микроскопе

При с‘емках с вертикальным осветнтелем об‘ектив выполняет роль конденсатора; это означает, что с помощью его нсточник света должен быть изображен в плоскости исследуемого металлнческого шлифа. По этой причине расстояния x и y на рис. 126 должны быть приблизительно равны друг другу. Если это условие выполнено, то получается следующее: когда об‘ектив направлен на исследуемый об‘ект, а окуляр вынут из микроскопа, то при достаточно больших размерах отверстия вертикального осветителя вся нижняя линза об‘ектива видна равномерно освещенной; но таким путем в поле зрения будет видно и изображение источника света, что конечно нежелательно. Это явление можно (хотя бы частично) устранить приблизив источник света к микроскопу миллиметров на 25 (т. е. изменив соотношения на рис. 126). Польза от такой меры большая при условии, что об‘ектив пропускает достаточно большую световую трубку.

Указанная мера конечно имеет некоторые отрицательные стороны, в частности приходится довольно значительно приближать к микроскопу источник света, в результате чего иногда возникают нежелательные, довольно значительные эффекты нагревания. Кроме того такое расположение частей предполагает наличие источника света, обладающего равномерно яркой светящейся поверхностью, по размерам не уступающей диафрагме окуляра для того, чтобы видимое в микроскоп поле зрения было равномерно освещено — условие, выполняемое сравнительно немногими источниками света.

Указанное затруднение можно преодолеть, установив источник света на расстоянии 75—100 *см* от микроскопа и поставив между ними коллектор с таким расчетом, чтобы увеличенное изображение источника света проектировалось в месте, отвечающем положению *L* на рис. 126. На рис. 127 схематически изображено изложенное выше расположение отдельных частей аппаратуры. Таким



127. Осветительная установка для микрофотографии (1-й тип). Перед коллектором *C* помещена диафрагма: *V* — вертикальный осветитель

путем можно равномерно осветить поле зрения; при этом значительная часть света однако бесполезно пропадает, так как, будучи собран коллектором *C*, свет после прохождения ирисовой диафрагмы *L* выходит снова расходящимся пучком; в результате в микроскоп попадает не все количество света, а только часть его. Более удобна следующая осветительная установка. Если между глазом и пламенем свечи поместить двояковыпуклую собирательную линзу так, чтобы глаз и линза находились относительно линзы в сопряженных точках, то линза представляется глазу в виде равномерно светящегося диска.

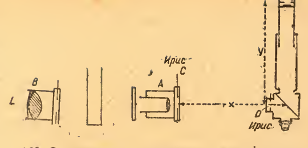
Такой светящийся диск конечно очень пригоден в качестве источника света для нашего микроскопа. На рис. 128 схематически изображено очень удобное расположение собирательных линз. Роль источника света по схеме рисунка 127 играет линза *A* с фокусным расстоянием около 150 *мм*. Изображение линзы проектируется в плоскости рассматриваемого, а затем фотографируемого шлифа. Коллектор *B* (с длиной фокусного расстояния около 75 *мм* и диаметра около 52 *мм*) установлен на таком расстоянии от *A*, что он проектирует изображение источника света *L* на линзу *A*. Далее, линза *A* проектирует *B* почти в местонахождении об'ектива микроскопа.

Так как места нахождения *A* и *L* являются сопряженными относительно *B*, то изображение *L* в *A* имеет вид светящегося диска; далее, так как даваемое системой *A* изображение коллектора *B* проектируется приблизительно в задней части об'ектива микроскопа в виде равномерно светящегося диска около 16 *мм* диаметром, то отверстие об'ектива микроскопа освещается полностью. С другой стороны, коллектор *B* и об'ектив микроскопа находятся в сопряженном положении относительно собирательной системы *A*; система *A* видна в микроскоп, как равномерно светящийся диск. Об'ектив микроскопа дает изображение светящегося диска в месте, где находится снимаемый металлический шкиф, который таким образом равномерно освещается.

В системе такого типа должны быть выполнены следующие важные условия:

1. Коллектор *B* должен быть короткофокусным (длина фокуса 60—70 *мм*) и хорошо исправленным. Если его фокусное расстояние значительно меньше 60 *мм*, то при больших размерах светящегося элемента поверхности, например точечной лампы, создаются затруднения. Увеличенное изображение источника света, проектируемое коллектором *B* в месте *A*, должно иметь в диаметре около 25 *мм*.

2. Достаточно, чтобы коллектор *А* имел в диаметре около 25 *мм* коллектор *А* должен быть снабжен ирисовой диафрагмой, обозначенной на рис. 128 буквой *С*. Эта диафрагма должна оставлять открытой поверхность, несколько бо́льшую, чем освещаемая. Таким путем отрезается весь свет, могущий повести к образованию „светового ореола“.




**128.** Осветительная устаиовка для микрофотографии (2-й тип). И коллектор *В*, и собирательиая система *А* снабжены диафрагмами; между обеими помещеиа кювета с водой. Непосредственно перед собирательиой системой *А* в этом схематическом чертеже показан светофильтр

3. Световой пучок, исходящий от коллектора *А*, должен быть достаточно велик, чтобы заполнить нижнюю линзу любого из применяемых об'ективов микроскопов. Если световой пучок не заполняет всей нижней линзы, это равносильно уменьшению апертуры и вызывает все те неприятные побочные явления, которые сопутствуют уменьшению апертуры. Если попытаться применить только одну собирательную систему (в *А*), то обнаруживается, что исходящий от нее световой пучок не заполняет об'ектива за исключением случаев, когда коллектор очень короткофокусный и светящаяся поверхность сравнительно велика.

Фокусное расстояние коллектора *А* должно конечно соответствовать длине тубуса микроскопа. Обычно предпочитают пользоваться тубусом длиной в 250 *мм*; соответственно этому выбирается и длина фокусного расстояния коллектора. Автор считает нужным отметить, что, работая с одной и той же собирательной системой, он и при коротком тубусе не испытывал никаких затруднений; просто в последнем случае нужно приблизить коллектор *А* к микроскопу на 50—75 *мм*, что связано с необходимостью соответственного перемещения и коллектора *В*. То обстоятельство, что в этом случае коллектор *А* несколько выводится из нормального для него положения, не влечет за собой никаких неприятных последствий.

Последовательность необходимых манипуляций при пользовании установкой, изображенной на рис. 128, следующая:

1. Приводят микроскоп в нужное положение на подставке, общей для всей аппаратуры, и нивеллируют, сначала грубо, об'ект на предметном столике.

2. Открывают источник света *L* и передвигают его вверх до тех пор, пока он не окажется в точности напротив отверстия коллектора *В*, т. е. будет на той же высоте относительно подставки, как и ось коллектора.

3. Открывают диафрагму *D* и наводят на снимаемый об'ект сначала при помощи более слабого об'ектива. Вначале освещенной

окажется только небольшая часть поля зрения; тогда передвигают лампу или поворачивают вертикальный осветитель таким образом, чтобы освещенная часть об'екта оказалась как раз посредине поля зрения. Затем удаляют окуляр, заглядывают непосредственно в тубус и постепенно закрывают ирисовую диафрагму $D$; при этом изображение ирисовой диафрагмы все время видно на месте нижней линзы об'ектива. Когда диафрагма почти нацело закрыта, ее изображение должно лежать точно в центре нижней линзы. Если этого нет, то передвигают ирисовую диафрагму (если она вообще подвижная) или соответственно поворачивают плоскопараллельное стекло вертикального осветителя (иногда приходится сделать и то и другое). Если требуется двигать плоскопараллельное стекло, нужно снова одеть окуляр и наново центрировать лампу $L$ описанным выше способом.

4. Коллектор $A$ приводится в такое положение, чтобы расстояния $x$ и $y$ (рис. 128) оказались приблизительно равными друг другу. Просвет ирисовой диафрагмы $C$ уменьшается, и коллектор центрируется при помощи этой диафрагмы таким образом, чтобы ее изображение казалось расположенным в центре поля зрения. Тогда поле зрения освещено равномерно, но разрешение изображения еще далеко не удовлетворительное, так как в образовании изображения принимает участие только малая часть об'ектива; последнее легко обнаружить, сняв окуляр и заглянув непосредственно в тубус.

5. Коллектор $B$ приводится в такое положение, что источник света проектируется им на месте коллектора $A$. Центрирование источника света достигается перемещением не источника света $L$, а коллектора $B$. По окончании центрирования коллектор $A$ должен испускать световой пучок, заполняющий целиком диафрагму вертикального осветителя.

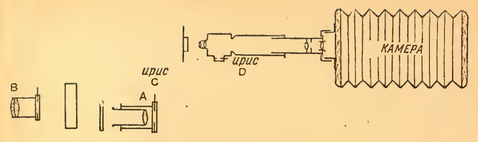
6. Отверстие диафрагмы $B$ сокращается до такой степени, чтобы ее изображение почти не было заметно в поле зрения.

7. Если затем удалить окуляр, то нижняя линза об'ектива оказывается освещенной целиком. Однако при этом наблюдается еще и легкий световой ореол; тогда сокращают ирис $D$ так, чтобы освещенным оказалось только около $^5/_6$ нижней линзы, и этим устраняют световой ореол.

Если все описанные манипуляции проведены тщательно, изображение в микроскопе оказывается равномерно и хорошо освещенным.

На светящейся поверхности источника света нередко попадаются небольшие элементы поверхности, менее яркие, чем остальные. Если это явление заметно и в изображении микроскопа, то коллектор $B$ приближают к источнику света до тех пор, пока изображение последнего перестанет проектироваться точно в $A$. Действительно изображение источника света может отодвинуться довольно далеко от $A$ без ущерба для качества изображения в микроскопе, оно только теряет при этом немного в яркости.

Для центрирования всей системы всегда рекомендуется пользоваться слабым об'ективом. Сильный об'ектив, необходимый для получения требуемого изображения, ввинчивается в микроскоп




**129.** Осветительная установка для микрофотографии

только по окончании центрирования. Небольшие изменения юстировки, которые могут потребоваться после завинчивания более сильного об'ектива, можно выполнить с помощью центрировочных винтов коллектора *A*.

Считаем нужным указать, что микрофотограммы рис. 120, *A*. и *B*, рис. 121, *C* и *D*, получены с использованием осветительной установки, построенной по схеме рис. 127, а при изготовлении микрофотограммы, воспроизведенных на рис. 121, *A* и *B*, и рис. 122, была применена коллекторная система по рис. 128.

Рис. 127 и 128 — это схематические эскизы применяемой автором микрофотографической аппаратуры, в которой микроскоп и камера монтированы в е р т и к а л ь н о, а коллекторная система — перпендикулярно к оптической оси микроскопа. В тех случаях, когда микроскоп и камера расположены г о р и з о н т а л ь н о, аналогичную коллекторную систему тоже можно монтировать перпендикулярно к оптической оси микроскопа и камеры; юстировка производится точно так же, как было описано выше. В последнем случае наши схемы на рис. 127 и 128 надо считать не вертикальной, а горизонтальной проекцией. По мнению автора, описанное взаимное расположение коллекторов можно горячо рекомендовать даже в тех случаях, когда по разным соображениям избирается горизонтальное расположение аппаратуры. Если коллекторную систему требуется установить параллельно оптической оси микроскопа, то по схеме рис. 129 световой пучок, идущий от коллекторной системы, отклоняется в вертикальный осветитель с помощью зеркала *M*. Такое расположение аппаратуры оправдало себя так же хорошо, как и описанное выше (единственной дополнительной частью является зеркало *M*). Для более слабых увеличений эти методы освещения однако не подходят. Путем соответствующих приспособлений надо предусмотреть, чтобы коллектор *A* не соприкасался со штативом микроскопа, что возможно, особенно в тех случаях, когда применяется штатив на трех ножках (английский).

Вместо того чтобы располагать зеркало *M* сбоку от микроскопа, как это изображено на рис. 129, можно использовать более простую установку, в которой отражающая система расположена над тубусом микроскопа. В этом случае пользуются вместо зеркала прямоугольной призмой полного внутреннего отражения. Преимущество такой установки заключается в том, что она требует

минимальных изменений в нормальном расположении микрофотографической аппаратуры, применяемом для фотографирования прозрачных об'ектов, так как приходится заботиться только о том, чтобы была возможность раздвигать на достаточную высоту рейтеры коллекторов и источника света. Если микроскоп велик, то присоединение коллектора *A* (рис. 129) к монтированному под углом в 45° зеркалу (или к призме) создает большие затруднения. Описанная аппаратура тоже не годится для слабых увеличений, так как, как мы увидим ниже, в этом случае коллектор *A* должен быть слишком придвинут к микроскопу.

### Ирисовая диафрагма вертикального осветителя

Ирисовая диафрагма вертикального осветителя работает совершенно так же, как и диафрагмы коллекторов. Если полностью открыть ирисовую диафрагму и затем постепенно ее сужать, то изображение об'екта при рассматривании его с помощью сильного или средней силы об'ектива кажется сначала довольно нерезким и завуалированным; оно будет все время улучшаться, т. е. становиться резче, пока диафрагмирование не достигнет определенной величины. При дальнейшем усилении диафрагмирования изображение перестает становиться лучше; при этом происходит незначительное увеличение поперечника пригодного поля изображения и, с другой стороны, затемнение изображения. Одновременно качество изображения начинает страдать от дифракционных явлений; последнее становится очень сильно выраженным, когда диаметр диафрагмы сильно уменьшается. С большинством апохроматов и полуапохроматов достигаются наилучшие результаты в том случае, если световой конус освещает около $^5/_6$ диаметра нижней линзы об'ектива (при рассматривании нижней линзы без окуляра). При более слабых об'ективах диаметр ирисовой диафрагмы вертикального осветителя может быть доведен до довольно малой величины без того, чтобы при этом наступало значительное ухудшение качества изображения. Диафрагмирование при более слабых об'ективах полезно в том отношении, что при нем достигается увеличение резко передаваемого поля изображения. Благодаря диафрагмированию в результате повышения глубины фокуса в изображении яснее выступают различные нерезкости шлифа (царапины, углубления, выступы).

### Светофильтры

В металлургии очень редко возникает необходимость пользоваться специальными фильтрами при фотографической с'емке металлического шлифа. Это обстоятельство сопряжено с известными упрощениями и позволяет пользоваться фильтрами, которые легко подобрать применительно к коррекции об'ектива.

К ахроматическому или полуапохроматическому об'ективу при условии применения ортохроматической пластинки лучше всего подходит зеленый или желто-зеленый фильтр. Автор пользовался зеленым фильтром Рюттена для трехцветной фотографии и орто-

хроматическими пластинками, достаточно чувствительными к зеленому цвету. Применение в данном случае панхроматической пластинки не дает никаких существенных преимуществ, а в некоторых случаях может быть даже вредно. Само собой разумеется, что фокусировка изображения происходит с включенным фильтром.

При пользовании апохроматическим об'ективом принципиально допустим для освещения свет любого цвета (длины волны), однако синий свет (в особенности при более сильных увеличениях) предпочтительнее зеленого и красного, так как пользование им дает повышение разрешающей способности. В своих работах автор обычно поступает следующим образом: он наводит на об'ект с включенным синим фильтром (синий фильтр для трехцветной фотографии), затем удаляет фильтр и фотографирует на обыкновенной, не ортохроматической пластинке. Этим достигается уменьшение времени экспозиции по сравнению со с'емкой с синим фильтром (кратность синих фильтров довольно велика). Описанный способ работы автора даже при самых сильных увеличениях дает очень хорошие результаты.

Редкие, специальные, случаи, когда окраска металлического шлифа затрудняет его фотографическое воспроизведение, укладываются в две производимые ниже категории: а) в фотограмме цветного участка металлического шлифа требуется сделать хорошо различимыми детали. В таком случае необходимо применять фильтр, пропускающий данный цвет, и кроме того конечно фотографическую пластинку, чувствительную к этому цвету. Автору в его практике с таким случаем пришлось встретиться всего только один раз; б) требуется повысить контраст между отдельными деталями, имеющими одинаковую яркость, но разный цвет. В этом случае применяется фильтр, пропускающий лучи одного цвета и поглощающий лучи другого цвета.

В практике автора встретился такой случай: нужно было сфотографировать пробу (шлиф) стали. Сталь была мягкая, включенный очень крупнозернистый перлит после легкого травления выглядел при слабом увеличении сине-зеленым. По различным соображениям более глубокое травление пробы было нежелательно (при травлении перлит стал бы значительно темнее). Фотографические снимки малого увеличения при желто-зеленом или синем свете не выявили практически никакого контраста между железом и перлитом. Великолепный результат получился только тогда, когда было применено красное освещение и панхроматическая пластинка.

## Увеличение

Вообще говоря, лучше всего выбирать сравнительно небольшие степени увеличения, так как в таком случае создается возможность удобного сопоставления различных снимков. Ниже мы помещаем таблицу наиболее употребительных в практике металлургии степеней увеличения (самые слабые увеличения не приводятся; к ним мы подробнее вернемся позже):

50 ×, 100 ×, (об'ективы с фокусн. расстоянием в 24 и 16 *мм*)
250 ×, 300 ×, 500 ×, „ „ „ в 12 и 8 *мм*)
500 ×, 750 ×, 1000 ×, „ „ „ в 4 *мм*)
1000 ×, 1509 ×, „ „ „ в 2 *мм*).

В очень многих случаях 100-кратное увеличение уже дает хорошее представление о структуре (составе) исследуемого материала (металла), поэтому чаще всего снимки делаются при 100-кратном увеличении.

Пользование свыше чем 1 500-кратным увеличением не дает никаких существенных преимуществ, и к нему прибегают только в самых исключительных случаях. Все детали, которые в состоянии передать (разрешить) современный апохроматический об'ектив с наибольшей апертурой, можно увидеть уже при 1 000 или 1 500-кратном увеличении. Всякое дальнейшее повышение увеличения ведет только к дальнейшему увеличению уже разрешенных об'ективом деталей. Все детали, видимые например на рис. 120, *A* и *B*, можно различить уже при 1 000—1 500-кратном увеличении; однако ввиду того, что при этом увеличении было бы трудно воспроизвести фотомеханическим путем детали негатива, применяют 3 000-кратное увеличение; это и есть один из случаев, когда полезны увеличения более сильные, чем в 1 500 раз.

Следует стремиться выходить из положения, пользуясь нормальными увеличениями, но из этого не надо делать слишком непреложного правила. Можно установить следующее правило: наиболее подходящее увеличение то, при котором лучше всего выявляются характерные особенности снимаемого шлифа. Другими словами, наименьшее увеличение, позволяющее хорошо рассмотреть структуру металлического шлифа, и будет наиболее подходящим, так как при этом увеличении охватывается наибольшее поле зрения и в снимке могут быть зафиксированы различия структуры в более протяженном поле зрения. Если получаемые микроснимки должны быть в дальнейшем воспроизведены фотомеханическим путем, то конечно необходимо принять во внимание технические требования, вытекающие из этого условия, и, как уже было упомянуто выше, выбрать такое увеличение, чтобы возможно было воспроизвести мельчайшие детали снимка.

Нетрудно подсчитать, какое получается увеличение при выборе определенного об'ектива, определенного окуляра, определенной длины тубуса и определенного растяжения камеры, если известны фокусные расстояния об'ектива и окуляра (или их увеличительная сила). Если длина тубуса равняется 250 *мм* и берется проекционный окуляр с увеличением в *n* раз, то получаемое увеличение определяется уравнением $\frac{A \cdot n}{B}$,

где *A* означает растяжение камеры, а *B* — фокусное расстояние об'ектива в миллиметрах. Растяжение камеры измеряется от кольца микроскопа, в котором укреплен окуляр, до матового стекла. Если длина тубуса не равна 250 *мм*, то в указанную формулу надо ввести множитель $\frac{\Delta}{250}$, в котором $\Delta$ означает фактическую длину тубуса.

Приведенная формула для хороших апохроматов, полуапохроматов, ахроматов и окуляров дает очень точно получаемое увеличение, так как в этих случаях данные, указываемые оптическими мастерскими для об'ектива и окуляра, отвечают действительности. Если же оптические константы об'ектива и окуляра указаны неточно, то увеличение, рассчитанное по приведенной формуле (и состоящее в этом случае из неверных элементов), может довольно сильно отличаться от фактического.

Данные, указанные производящей фирмой, можно проверить при помощи об'ектмикрометра с делениями в $^1/_{10}$ и $^1/_{100}$ *мм* путем промера изображений, соответствующих об'ектам таких размеров. У большинства об'ектмикрометров деления нанесены на стекле. Ввиду того что при свете, падающем сверху, чрезвычайно трудно делать наводку на деления, нанесенные на стекле, для наших целей более удобны микрометры с делениями, выгравированными на полированной металлической полоске. Такие шкалы на металле изготовляются например фирмой Цейсс.

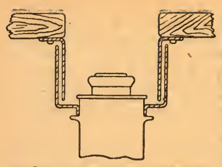
## Наводка на об'ект (фокусирование)

Когда фотографируемый металлический шлиф лежит под микроскопом, затем когда источник света и коллекторная система установлены правильно (причем микроскоп сначала используется визуально), проекционный окуляр приводится в положение, отвечающее требуемому растяжению камеры, между окуляром и камерой создается светонепроницаемое соединение, и камера растягивается на нужную длину. Каким образом создается непроницаемое для света соединение между окуляром и камерой, пояснено на рис. 130.

При наводке сначала пользуются матовым стеклом, передвигая об'ект до тех пор, пока его изображение не окажется посредине матового стекла. После этого вставляется светофильтр, который будет применен при с'емке, и затем снова производится фокусировка с использованием в качестве экрана простого стеклянного диска и при помощи слабой лупы. Лупу надо наводить на внутреннюю поверхность стеклянного диска. Нужное положение лупы легче всего отыскать следующим путем: против внутренней стороны стеклянного диска держат кусочек бумаги с печатным текстом и стараются точно навести на печать.

## Экспозиция (освещение)

Вопрос о том, какой применить сорт пластинок, разрешается, как уже было упомянуто выше, в зависимости от того, какой взят об'ектив. Выше мы в первую очередь рекомендовали апохроматы и полуапохроматы. Работая с апохроматом, можно взять или хорошую пластинку высшей чувствительности (экстрарапид) или же в случае хороших условий освещения — менее чувствительную пластинку, т. е. обыкновенную или же фотомеханическую пла-



130. Светонепроницаемое соединение между микроскопом и камерой

стинку. При работе с пластинкой высокой чувствительности продолжительность экспозиции сильно уменьшается. Фотомеханические пластинки, как дающие богатые контрасты, особенно уместны в тех случаях, когда снимаемые об'екты бедны контрастами. Кроме того эти пластинки отличаются более мелким чем высокочувствительные пластинки, зерном, что представляет особые преимущества в том случае, если полученный негатив нужно подвергнуть последующему увеличению. Здесь мы напоминаем читателю, что апохроматы дают в общем более вялое изображение, чем ахроматы, так как образование дымки у первых сказывается сильнее, чем у вторых (см. выше).

В отношении продолжительности, необходимой при с'емке экспозиции, можно дать только самые общие указания, так как она зависит от очень многих условий и обстоятельств. Приводимая ниже таблица, используя один пример, дает общую ориентировку. Об'ект: чистое железо (феррит) с перлитом (мягкая сталь). Источник света: 500-свечная точечная лампа. Коллекторная система: как в рис. 127. Вертикальный осветитель с плоскопараллельным стеклом; ирисовая диафрагма вертикального осветителя была открыта на $^5/_6$ своего диаметра.

| Об'ектив | Увеличение | Сорт пластинок | Фильтр | Продолжительность освещения в сек. |
|---|---|---|---|---|
| 24-*мм* апохромат A = 0,30 | 100 | „Wratten-Process | Никакого | 3—5 |
| 24-*мм* апохромат A = 0,30 | 100 | Тот же | Зеленый Рэттена (для трехцветной) | 20—30 |
| 4-*мм* апохромат A = 0,95 | 500 | „ | Никакого | 10—20 |
| 2-*мм* апохромат A = 1,4 | 1 000 | „ | „ | 20—40 |

Если все время фотографируется один и тот же об'ект и с'емка при прочих равных условиях производится с различным увеличением, то продолжительность освещения меняется с квадратом увеличения. Если окуляр, длина тубуса и растяжение

камеры остаются без изменения, но каждый раз пользуются другим об'ективом, то продолжительность освещения меняется обратно пропорционально квадрату диаметра отверстия *D* ирисовой диафрагмы (при пользовании коллекторной системой согласно рис. 128). Продолжительность освещения в значительной мере зависит также от удельной яркости снимаемого металлического шлифа, что особенно сказывается при сильных увеличениях, когда должны быть переданы детали в самых темных участках шлифа. Начинающему лучше всего следует рекомендовать истратить на опыты с дюжину пластинок и в процессе этих опытов испробовать, какие эфекты достигаются в изображении при различных продолжительностях освещения и разных способах проявления.

## Проявление негативов

Нужно твердо запомнить, что микрофотографические негативы в целях достижения сильных контрастов должны проявляться дольше, чем негативы ландшафтных снимков. Рекомендуется брать энергично действующий проявитель, так как при пользовании обычным проявителем было бы необходимо продолжительное проявление. Автор пользуется нижеуказанным (довольно концентрированным) гидрохиноновым проявителем, работающим быстро и очень контрастно.
Его рецепт следующий:

| | | |
|---|---|---|
| Гидрохинона | — | 25 *г* |
| Метабисульфита калия | — | 25 „ |
| Бромистого калия | — | 25 „ |
| Воды | — | 1 000 *см*³ |
| Едкого натрия | — | 50 *г* |
| Воды | — | 1 000 *см*³. |

Растворы А и В смешиваются в равных частях.
В этом проявителе в течение 2—3 мин. достигается отличный контраст и получаются хорошо крытые негативы. Какой бы ни был взят проявитель, лучше всего проявлять п о в р е м е н и (т. е. руководствоваться фактором проявления). Совершенно так же, как и в других областях фотографии, и здесь всегда предпочтительнее работать с хорошо испробованным проявителем и основательно изучить все его свойства. Самое лучшее путем ряда опытов установить, при какой продолжительности проявления лучше всего выявляются контрасты.

## Копирование с негативов

В отношении копирования ничего особенного сказать нельзя, так как этот процесс выполняется совершенно так же, как вообще принято в фотографии. Наилучшие результаты получаются на

бромосеребряных и газопечатных бумагах (без вирирования) Особенно хорошо передаются детали на глянцевой бумаге.

## Косое освещение об'екта

Вертикальный осветитель, как известно, дает так называемое вертикальное, или прямое, освещение, т. е. он посылает свет на снимаемый металлический шлиф отвесно сверху. Поэтому плоская поверхность, ориентированная перпендикулярно к оптической оси вертикального осветителя, отражает падающий свет перпендикулярно и кажется в микроскопе яркой; в отличие от этого шероховатая поверхность в большей или меньшей степени рассеивает свет в стороны и вследствие этого кажется темной. Если падающий на металлический шлиф пучок лучей наклонен к оптической оси микроскопа под определенным углом, то иногда горизонтальный участок поверхности отражает свет таким образом, что последний совсем не попадает в микроскоп, и потому данный участок кажется темным, в то время как какие-нибудь другие, неравномерно расположенные участки могут быть ориентированы таким образом, что отражаемый ими свет попадает в микроскоп, — эти участки кажутся светлыми. Можно в общем сказать, что эффекты освещения, обусловленные, с одной стороны, нормальным (прямым), и с другой стороны — косым освещением, относятся друг к другу, как фотографический позитив к фотографическому негативу.

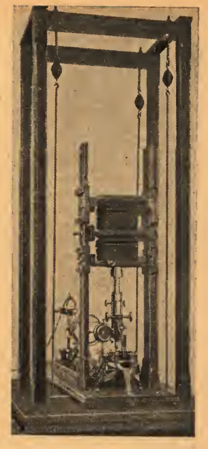
В металлографии косое освещение не играет существенной роли. Если же по каким-либо соображениям оно иногда желательно, то лучше всего оно достигается с помощью параболического отражателя, укрепленного или на самом об'ективе или же на штативе. Конечно применение его возможно только при пользовании более слабыми линзами об'ективов (с фокусным расстоянием не меньше 16 или 24 *мм*). Работая с параболическим отражателем, скажем В. Уатсона, направляют на него пучок параллельных лучей; лучи отражаются им назад и падают на поверхность металлического шлифа. Маленькое зеркало, иногда монтируемое на рефлекторе (ошибочно называемом либеркюновским зеркалом) под углом в 45° к вертикально расположенной оптической оси, предназначено для создания вертикального (прямого) освещения; в соответствующих случаях оно отводится в сторону.

## Сотрясения микрофотографической аппаратуры

Часть затруднений, создающихся при работе с микрофотографической аппаратурой, можно вполне отнести за счет сотрясений, возникающих в особенности в фабричных лабораториях. Поэтому очень важно, особенно при сильных увеличениях, насколько только возможно сократить время освещения, так как даже короткая экспозиция (в несколько секунд) достаточно длинна для того, чтобы происшедшее на ее протяжении сотрясение дало себя неприятно почувствовать, в особенности опять-таки при сильных увеличениях. Если камера, микроскоп и осветительная установка монтированы на общей подставке (доске), как это рекомендуется

автором, то лучше всего можно элиминировать вибрации, подвесив всю аппаратуру на пружинах.

Рнс. 131 показывает, как монтирована аппаратура у автора. Доска основаиия покоится на двух стальных полосах, укреплеиных на четырех железиых штангах, каждая толщиной около 10 *мм*; штанги висят на 4 коротких спиральных пружииах, в свою очередь подвешенных к деревяииому сооружению, стоящему, как показаио на рисунке, на твердой подставке. Размер пружин нужио подбирать с таким расчетом, чтобы они легко поддерживали всю аппаратуру. Автору хотелось бы отметить, что с изображеныим на рис. 131 аппаратом он вполне успешно получал 1 000—1 500-кратное увеличение, хотя его лаборатория помещалась всего в 50 *м* от мастерских с четырьмя паровыми молотами мощностью по 8 *т* н кроме того поблизости были расположены три железнодорожные линии, входящие в туннель. Если заметиые сотрясения ие велики, то хорошие результаты может дать также подвешивание аппаратуры иа тросах. Во всяком случае способ с подвешиванием практичнее и целесообразнее установки аппарата на резиновой нлн войлочной подушке.



**131.** Микрофотографическая аппаратура Дж. Монайпеннн. Вся аппаратура подвешана на пружинах

## Микрофотография при слабом увеличении

Часто перед намн стоит задача воспроизведения при слабом увеличеиии сравнительно большнх поверхностей куска металла прн вертикальном нли падающем сверху освещении. Нормальные объективы с длиной фокуса в 50—75 *мм* дают 20—40-кратное увеличеине; прн этом можио пользоваться осветительной системой, подобной изображенной на рис. 128. Получаемое при этом поле зрения сравиительно мало: его днаметр не превышает 2—3 *мм*. При желаини добиться в изображеннн большего поля зрення приходнтся столкнуться с большимн затрудненнями в отиошеннн освещення; помимо этого в таких случаях нногда убывает резкость по направлению к краю нзображения. Однако часто совершенио необходимо охватнть большое поле нзображения, чтобы снимок удовлетворнл своему назначенню, иапример, когда зада-




**132.** Осветительная система для микрофотографии при слабом увеличении

ча сводится к тому, чтобы в одном снимке дать довольно большую группу трещин (царапин, дефектов материала), очень грубую структуру или далеко отстоящие друг от друга поверхности. В таких случаях приходится снимать поле зрения размером в 10—15 *мм* при 10—15-кратном увеличении.

Автор предложил для этих целей расположение аппаратуры, изображенное на рис. 132. Буквой *A* на рисунке помечен об'ектив. Коллектор *D* дает увеличенное изображение источника света *C* (точечной лампы в 500 свечей), проектируя его в *E*, т. е. в непосредственной близости к коллектору *F*; последний посылает изображение источника света дальше (после отражения светового пучка от наполовину высеребренного и наклоненного под углом в 45° к оптической оси микроскопа зеркала *G* и от поверхности металлического шлифа *B*) в местонахождение линзы *A* (начиная от коллектора *F*, путь лучей изображен пунктиром). *D* и *F* — конденсорные линзы Уатсона-Конради, с помощью которых легко достигается освещение поля зрения размером около 25 *мм*. Зеркало *G* (46 $\times$ 32 *мм*) вправлено в легкую металлическую раму, надлежащим образом соединенную с об'ективом; в целях регулирования освещения зеркало вращается около горизонтально лежащей оси.

В данной установке употреблялся проекционный об'ектив (микропланар) с фокусным расстоянием в 35 *мм*; в целях охвата возможно большего поля зрения этот об'ектив применялся самостоятельно, т. е. без окуляра; таким образом растяжение тубуса микроскопа устранялось. Внутренняя поверхность тубуса микроскопа обкладывается в этих случаях черной материей во избежание отражений. Для таких работ предпочтительнее конечно, работать только с длинным тубусом. Автор пользовался микроскопом с диаметром тубуса около 50 *мм* и длиной около 120 *мм*. Эти размеры позволяют целиком использовать все поле зрения, охватываемое 35-*мм* об'ективом. Рис. 133 представляет снимок образца прокаленной стали; микрофотография получена со слабым увеличением (около 10 раз) описанным выше способом.

Получаемые таким путем увеличения зависят от максимального и минимального растяжения камеры. Аппарат автора дает увеличения от 9 до 23 раз при об'ективе с фокусным расстоянием в 35 *мм*.

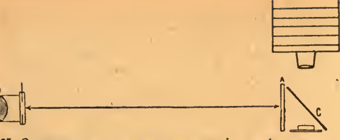
Растяжение камеры *l*, необходимое для определенного увеличения *M*, вычисляется по следующей формуле: $l = (M + 1)\ f$, где $f$



**133.** Прокаленная сталь (увеличено в 10 раз). Микропланар Цейсса с фокусным расстоянием в 35 *мм*. Пластинка Imperial-Process, без всякого фильтра. Осветительная система, как на рис. 132



**134.** Горячая обработка мюнц-металла (40-кратное увеличение). Об'ектив Уатсона с фокусным расстоянием в 50 *мм*, 5-кратный холоскопический окуляр, пластинка Allochrom Реттэна, зеленый фильтр Реттэна для трехцветной фотографии. Осветительная система, как на рис. 132




**135.** Осветительная установка для микрофотографии при совсем слабом увеличении (приблизительно 5)

означает фокусное расстояние об'ектива (*l* измеряется от об'ектива до матового стекла).

При получении слабых увеличений применяемая степень увеличения, само собой разумеется, в значительной мере зависит от величины передаваемого поля зрения. Если надо сфотографировать например трещину в материале (щель), то большей частью важнее охватить всю трещину, чем добиться какой-нибудь совершенно определенной степени увеличения (скажем, в 10 × 15 × 20). Для 30—50-кратных увеличений лучше всего пользоваться осветительной установкой, изображенной на рис. 132, применяя ее с обыкновенным об'ективом (фокусное расстояние в 50 *мм*). В данном случае коллектор *F* должен быть отодвинут от микроскопа настолько, чтобы он изображал собирательную систему *D* на месте воспроизводимого об'екта. Источник света *C*, изображающийся при посредстве *D* в месте *F*, освещает в об'екте круг диаметром около 6 *мм*. Таким образом коллектор *F* ведет себя, как конденсор микроскопа (осветительный прибор); его ирисовая диафрагма регулируется таким же образом, как и диафрагма *D* в рис. 128. На рис. 134 дан снимок при 40-кратном увеличении, полученный описанным выше путем с помощью об'ектива с фокусным расстоянием в 50 *мм*; ясно видно полосатое строение, характерное для сильно нагретого мюнц-металла (сплава, названного по имени открывшего его Мюнца в Бирмингаме, состоящего из 60% меди, 39% цинка и 1% железа и применяемого главным образом для покрытия деревянных корабельных палуб).

Для еще более слабых увеличений (в 4—5 раз) применяются фотографические об'ективы с фокусным расстоянием в 50—150 *мм*. В этих случаях отказываются от микроскопа, об'ектив просто помещается под коротким тубусом, в котором он ходит вверх и вниз с помощью нарезки, зубчатки с маховичком или шнека; тубус укрепляется на передней стороне камеры. Для получения и в подобных случаях верхнего освещения очень удобно пользоваться осветительной системой, изображенной на рис. 135. Коллектор *B* Уатсона-Конради посылает пучок параллельных или слегка расходящихся лучей на матовое стекло *A*. Свет, пропущенный матовым стеклом, отражается стеклянной пластинкой *C* (рефлектором), наклоненной под углом в 45° к вертикали (в качестве рефлектора берут покровное стекло диапозитива или отмытую фотографическую пластинку).

В принципе дело сводится к тому, чтобы равномерно осветить на матовом стекле *А* некоторый круг и направить на об'ект свет, исходящий от поверхности этого круга. Полученная таким путем фотограмма при совсем слабом увеличении удобна для передачи например стальных проб, травленных препаратами меди (по Стэду, Розенгайну или Ле-Шателье). Если требуется получить такие снимки при косом освещении, берут две лампы накаливания по 100 свечей, монтированные на штативах, и устанавливают их вправо и влево от об'ектов.

## Фотографирование небольших металлургических об'ектов (металлических проб)

Металлургу часто приходится фотографировать мелкие металлические предметы, например пробы металлов, небольшие заготовки и т. д. В таких случаях можно применить одну из описанных выше установок. Если же задача сводится к репродукции в натуральную величину или к уменьшению, берут обыкновенную фотографическую камеру для формата 9 × 12 или 13 × 18 *см*. Лучше всего поставить камеру на деревянном бруске, который можно по направляющим передвигать по деревянной доске. На одном из концов доски находится вертикально стоящий мольберт; при работе с об'ективом, фокусное расстояние которого равно 125—150 *мм*, длина доски должна быть около 0,90—1,20 *м*. Очень тонкие об'екты (например тонкие шлифы) можно просто слегка укрепить на мольберте. Когда об'ект правильно монтирован, передвигают деревянный брусок, на котором стоит камера, до тех пор, пока изображение достигнет требуемой величины. Об'екты больших размеров (толстые металлические пробы, металлические шлифы) помещают на низких подставках и укрепляют на них. Самое лучшее освещение для рассматриваемых случаев — это дневной свет. Если работа при дневном свете невозможна, очень удобно пользоваться двумя лампами с металлической нитью по 100—200 свечей, устанавливаемыми по бокам снимаемого об'екта. Если поверхность снимаемого об'екта неплоская и на снимке требуется ясно показать его об'емность, освещение дают только с одной стороны.

Если нужно фотографировать полированные металлические шлифы, то освещение никак не должно быть боковым, иначе светлые участки поверхности выйдут темными. С таких об'ектов можно получить удовлетворительные снимки, поместив эти об'екты на большой кусок гладкой белой бумаги и загнув ее края вверх так, чтобы они возвышались со всех сторон над металлическим шлифом. Загнутые края белой бумаги отражают падающий на них свет на металлический шлиф, который, особенно если наклонить его к оси камеры, выходит светлым. На рис. 136 дан снимок, полученный таким путем; проба была отполирована и местами вытравлена; требовалось, чтобы следы травления вышли в снимке в виде темных пятен на светлом фоне.

Как известно, более значительные по размерам травленые участки поверхности шлифа металла довольно сильно блестят (они



136. Травленые стальные пластинки, натуральная величина. Снимок сделан при почти вертикально падавшем свете

подвергаются травлению для выявления макроструктуры материала), когда лежат в травящей жидкости, и теряют блеск, как только высохнут. Поэтому подвергшиеся травлению металлические пробы лучше всего фотографировать в мокром виде, для чего их кладут в чашку с водой, спиртом или светлым прозрачным маслом; если такой прием в работе почему-либо не применим, то металлический шлиф покрывают тонким слоем глицерина или какого-либо светлого (прозрачного) масла.

Если металлический шлиф лежит в чашке, наполненной жидкостью, то камера должна быть поставлена вертикально над об'ектом. Такое положение камеры легко осуществить, укрепив на массивной деревянной доске вертикальную стальную трубку, вдоль которой передвигается металлическая гильза с вмонтированной в ней камерой. Такое монтирование камеры особенно удобно в тех случаях, когда приходится фотографировать какие-нибудь кованные изделия или части машин сложной формы. Подобные об'екты кладут просто на светлом фоне и этим избавляют себя от труда по закреплению их посредством каких-либо приспособлений в вертикальном положении. Сильно отполированные неплоские поверхности довольно трудно фотографировать вследствие возникающих на отдельных участках отражений. Если например в изображении об'екта требуется четко выделить трещину, это легко достигается тем, что поверхность об'екта подвергается легкому травлению и ее яркость таким путем уменьшается.

## Фотографирование машин, аппаратов и различных технических приборов

Фотографирование машин — работа чрезвычайно сложная, и к применяемой при этом аппаратуре пред'являются сравнительно высокие требования. Прежде всего для этого требуется очень прочно построенная (так называемая дорожная) камера, об'ективная часть которой может передвигаться во всех направлениях, а также наклоняться. Последнее относится и к задней части. Формат выбирается применительно к поставленным требованиям.

Часто пользуются форматом 13 × 18 *см;* снимки такой величины обычно считаются уже вполне удовлетворительными. Снимки конечно можно увеличивать, но это требует наличия довольно большого и потому дорого стоящего увеличительного аппарата. Для этих снимков следует брать только хорошие об'ективы. Все современные хорошие анастигматы безусловно годятся для наших целей. Фокусное расстояние об'ектива для с'емки должно быть в общем не слишком коротким (для формата 9 × 12 *см* оно должно составлять около 15 *см*). Часто бывает необходим широкоугольный короткофокусный об'ектив для формата 9 × 12 *см,* в особенности, когда это вызывается ограниченным пространством. Для снимков этого рода всегда надо пользоваться пластинками с подслоем и в общем высокой чувствительности. Ввиду того что даже в пластинках с подслоем не исключена возможность образования ореолов, рекомендуется пользоваться плоской пленкой.

Правильное освещение снимаемого об'екта доставляет часто много затруднений; это сказывается например при фотографировании большой машины в цеху. Если в цеху имеется большая входная дверь и машину не трудно передвинуть, то обычно машину поворачивают боком к двери (под углом около 20° к ней). Таким образом об'ект получает боковое освещение, и его очертания лучше выделяются, чем если освещение было бы фронтальным, а камера установлена прямо против об'екта. В машиностроительных мастерских пол часто бывает выпачкан и потому отражает мало света; если разложить по полу вокруг фотографируемой машины газетную бумагу, условия освещения улучшаются, так как от пола идет отраженный свет. Следует пользоваться по возможности ничем не заполненным фоном, который можно создать, помещая позади об'екта деревянную раму с натянутым на нее полотном, упаковочной или газетной бумагой и пр. Большие трудности возникают, когда мастерская темная и всю машину целиком сдвинуть нельзя. К этому присоединяется еще то обстоятельство, что во время необходимой в этих условиях продолжительной экспозиции возможны сотрясения об'екта, если с'емка производится в то время, когда производство на ходу. Поэтому часто фотографирование возможно только тогда, когда работы остановлены.

В качестве искусственного источника света можно рекомендовать свет магния. При сжигании магния надо позаботиться о том, чтобы испускаемый им свет был распределен равномерно. С этой целью магний помещается сбоку позади камеры в коробочке, открытая часть которой прикрывается листком папиросной бумаги или другим каким-нибудь прозрачным материалом. Также рекомендуется одновременно сжечь несколько маленьких листочков магния позади камеры для того, чтобы достаточно хорошо осветить теневые участки об'екта.

Часто фотографирование машины затрудняется бликами на ярко отполированных частях; блестящие части следует перед с'емкой смазать пастой, состоящей из вазелина с мелом.

Устанавливать машину перед с'емкой должно лицо, хорошо знакомое с отдельными частями машины и знающее, какие именно

части должны быть особенно выделены на снимке. Каждой подвижной части машины нужно придать такое положение, в котором ее назначение особенно бросалось бы в глаза. Правильное положение машины при с'емке имеет существенное значение.

При фотографировании других об'ектов из области техники тоже возникают различные затруднения, так как часто приходится применяться к самым разнообразным условиям (пример: фотографическое фиксирование продвижения работы на стройке). Такие снимки требуют самых разнообразных положений камеры и ее частей (передней и задней), на что мы уже указали выше, а также применения об'ективов с разными фокусными расстояниями. Дать прямые, точные указания для всех этих работ невозможно; каждый отдельный случай требует особого подхода, и поставленная цель достигается путем применения всякий раз других об'ективов, пластинок и фильтров. Тут для фотографа открывается широкое поле деятельности.

Интересный способ фотографического фиксирования различных изменений, возникающих по ходу постройки, в сложных группах об'ектов и т. д. (а также незначительных изменений в об'ектах самого различного вида) описан Стильманом[1]. Получают негативное изображение об'екта, в котором можно в дальнейшем ожидать какие-либо изменения; как только есть основание предполагать, что ожидаемые изменения наступили, об'ект снова фотографируется, совершенно в тех же самых условиях, что и в первый раз (та же камера, тот же сорт пластинок, та же позиция при с'емке и то же положение камеры). Затем с одного негатива готовится диапозитив, кладется на второй негатив, и оба совместно рассматриваются в проходящем свете. Если изображения получены с соблюдением выше перечисленных условий, то части об'екта или группы об'ектов, оставшиеся неизмененными при второй с'емке, будут в проходящем свете казаться участками равномерной плотности, в то время как изменения в об'екте скажутся в нарушении упомянутой равномерности. Стильман предложил отмечать таким путем продвижение работ на различных инженерных строительствах (например при постройке мостов); он предложил этот метод также для обнаружения изменений, если последние внесены в важный документ или чертеж.

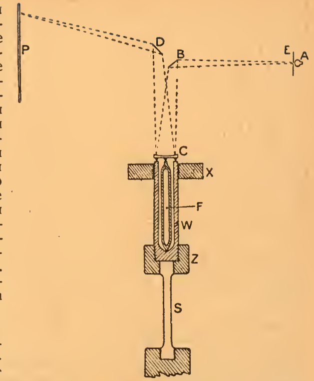
## Применение фотографии в регистрирующих приборах

Применение так называемого «оптического рычага» для измерения отклонения различных подвижных частей приборов получило самое широкое распространение в металлургии, машиностроении и в инженерном деле. В металлургии приобрели большую известность регистрирующий пирометр Робертса-Остена и двойной гальванометр Саладина. Для инженера-электрика важное значение имеют различные осциллографы.

Одним из новейших приборов этого рода является оптически регистрирующий измеритель сопротивления скручиванию В. Е. Дальбея, предназначенный для получения точных диаграмм сопротивления растягивающему усилию различных материалов.

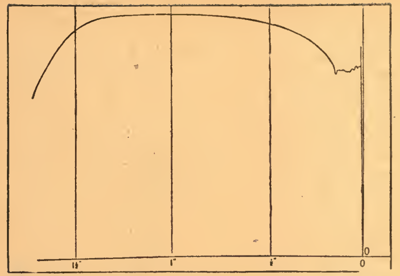
[1] Bureau of Standarts, Scient. Papers № 392.

При пользовании этим прибором исключены различные ошибки, получающиеся при работе с другими испытательными машииами. Прежде всего при пользоваиии этим прибором совершеиио исключается эфект иерции. Мы опишем прибор Дальбея подробиее для того, чтобы лучше уясиить принцип устройства регистрирующих приборов этого рода. Прибор схематически изображеи иа рис. 137.




**137.** Схема измерителя сопротивления скручиванию по В. Е. Дальбею

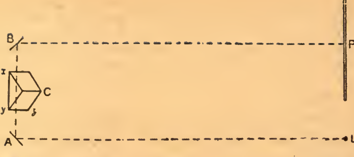
Свет от источика *A* проходит через малое отверстие в экране *E*, затем падает иа неподвижное зеркало *B*, отражается ст него и попадает иа вогнутое зеркало *C*; здесь свет сиова отражается, попадает иа зеркало *D* и, отразившись в нем, падает на фотографическую пластинку *P*. *E* и *P* расположены относительио вогнутого зеркала *C* таким образом, что расстояния *EBC* и *CDP* являются сопряженными расстояниями от зеркала до об'екта и до изображения; поэтому на пластиике *P* рисуется резкое изображение отверстия в экраие *E*. Влияние нагрузки, действующей на испытуемую штаигу *S*, измеряется по эластическому растяжеиию второй штанги, иазываемой коромыслом весов *W*. При посредстве соедииительиых пластин *X* и *Y* иагрузка передается с испытательиой машины иа испытуемую штангу *S*; испытуемая штанга соедииеиа с полым коромыслом весов *W* посредством соединительной пластины *Z*. Сечеиия *S* и *W* рассчитаны таким образом, что всякая иагрузка, могущая повести к разрыву штанги *S*, не выходит за пределы эластичности *W*. Напряжение, испытываемое штангой *S*, всегда пропорционально одновременно претерпеваемому коромыслом весов *W* растяжению. Это растяжеиие измеряется с помощью вогнутого зеркала *C*, укрепленного в трех точках, из которых одна поддерживается штаигой *F*. Второй конец этой штанги заостреи и покоится в конической выемке коромысла *W*, как это хорошо видно из рисунка.




**138.** Диаграмма нагрузки (натяжения) — растяжения мягкой стали. Диаграмма получена с помощью прибора Дальбея

Вращение коромысла приводит к тому, что зеркало *C* поворачивается вокруг оси, параллельной плоскости чертежа. Вращение испытуемой штанги *S* во время испытания обусловливает (при посредстве соединительной пластины) поворот зеркала *D*, а именно вокруг оси, перпендикурярной оси вращения зеркала *C*. Вращение зеркала *D* заставляет луч света двигаться по пластинке *P*; это движение совершается в плоскости, параллельной плоскости чертежа; таким образом оно перпендикулярно к движению луча света, обусловленному вращением зеркала *C*. В результате луч света во время опыта с нагрузкой описывает кривую, ординаты которой пропорциональны нагрузкам, испытываемым исследуемым об'ектом, или, вернее, растяжением, обусловленным этими нагрузками. Вышеописанный метод измерения растяжений свободен от всяких связанных с ошибками влияний инерции, и ввиду его зависимости только от эластичного растяжения этот метод дает кривые натяжения-растяжения, безукоризненно передающие зависимость между нагрузкой (натяжением) с одной стороны, и растяжением во время нагрузки — с другой. Описанный прибор позволяет также определять влияние продолжительности нагрузки даже при очень значительных нагрузках. Дальбей опубликовал кривые натяжения-растяжения, касающиеся проб мягкой стали, разрывающихся в продолжение 4 секунд. Полученные кривые ясно показывают, как быстро могут уменьшаться нагрузки, выдерживаемые мягкой сталью при испытании, после того как уже был достигнут предел прочности материала.

Предложенный Дальбеем прибор был выпущен фирмой Буктон в Лидсе (Англия) в виде двух моделей. Одна модель допускает общее растяжение исследуемого тела до 40 *мм* и служит для записи полной диаграммы натяжения-растяжения. Во второй моде-




**139.** Схематический эскиз двойного гальванометра Саладина

ли растяжение изображается в увеличенном виде для ясной передачи, в особенности положения границы пропорциональности. На рис. 138 дана диаграмма, полученная при испытании мягкой стали на модели первого из указанных типов.

Аналогичные методы применимы конечно во всех тех случаях, где дело сводится к одновременному изменению двух различных величин при условии, что изменения этих величин дают возможность приводить в движение пару зеркал. Если одной из переменных является время, то одним из упомянутых зеркал пользуются для измерения таким образом, что приводят его в движение часовым механизмом, или одно из зеркал совсем исключают и часовым механизмом приводят в движение фотографическую пластинку. В последнем случае фотографическую пластинку обычно заменяют полосой светочувствительной бумаги, наматываемой на барабан, который приводится в движение часовым механизмом. Таким барабаном снабжен регистрирующий пирометр Робертса-Остена.

В некоторых случаях трудно установить во взаимно перпендикулярном положении оси вращения обоих зеркал. Примером этого может послужить двойной гальванометр Саладина, который зарисовывает одновременно происходящие отклонения двух гальванометров и в котором оси вращения обоих зеркал взаимно параллельны. В этом случае выходят из положения таким образом, что горизонтальные отклонения луча света после отражения в первом зеркале превращают в вертикальные, заставляя свет пройти прямоугольную призму, основание которой параллельно линии, соединяющей зеркала между собой, и наклонено под углом в 45° к горизонтальной плоскости. Схема подобной установки приведена на рис. 139, где *A* и *B* — оба зеркала, *O* — призма, *L* — источник света и *P* — фотографическая пластинка. Грань *xy* призмы расположена горизонтально и параллельно соединительной линии между зеркалами, грань *yz* наклонена к горизонтальной плоскости под углом в 45°. Зеркало *A* — вогнутое, *L* и *P* находятся в местах, сопряженных относительно зеркала *A*. Зеркало *B* — плоское; оно должно иметь достаточно большие размеры в вертикальном направлении, чтобы иметь возможность улавливать движения луча в вертикальном направлении, вызванные горизон-

тальными отклонениями зеркала *A*. Ясно конечно, что оба зеркала должны быть монтированы возможно ближе одно к другому.

Изложенные выше методы применимы конечно и во многих других случаях и в различных инструментах.

## Литература

Систематического изложения материала, разобранного в этой главе, нигде не имеется; в соответствующих специальных журналах случайно попадаются статьи, имеющие своим предметом нашу тему и разбирающие какой-нибудь специальный случай.

7 ГЛАВА

# МИКРОФОТОГРАФИЯ

ГЕОРГ РОДМЕН

## Введение

Попытки фотографического фиксирования об'ектов, визуально наблюдаемых в микроскоп, делались уже в то время, когда фотография находилась еще в начальных стадиях своего развития. Первые опыты фотографического запечатления микроскопических об'ектов относят к 1837 г. В этом году Дж. Рид делал с помощью об'ектива микроскопа сильно увеличенные снимки (микрофотограммы) на коже, очувствленной к действию света путем обработки ее азотнокислым серебром. В дальнейшем он заменил кожу бумагой, сперва задубленной в настое чернильных орешков, а затем очувствленной азотнокислым серебром. С помощью микроскопа он сделал на препарированной таким путем бумаге увеличенный снимок блохи; для экспозиции ему потребовалось около 5 мин. Фиксирование изображения производилось в растворе гипосульфита. Таким образом Рид мог в сравнительно короткое время изготовить хорошее об'ективное изображение, получение которого путем зарисовки от руки заняло бы очень много времени.

Позднейшее введение в фотографическую практику сухой пластинки, обработка которой не представляла трудностей, повело к тому, что фотография стала применяться все шире и шире в тех случаях, когда преследовалась безукоризненно точная передача тонких деталей строения об'екта. Если учесть свойства современных пластинок (большую общую светочувствительность, улучшенную цветочувствительность, т. е. способность передавать визуальные впечатления в отношении градации яркости об'екта, если учесть, далее, что в настоящее время до известной степени возможно даже фотографическое воспроизведение оригинала в цветах, что успехи в области технической оптики позволяют строить отлично исправленные об'ективы, обладающие прекрасной разрешающей способностью, то станет ясно, почему фото-

графия все чаще ставится на службу научной и технической микроскопии. В последующем изложении мы и займемся рассмотрением этой области прикладной фотографии.

Область применения микрофотографии так велика и соприкасается со столькими областями знания, из которых каждая имеет свои характерные особенности, что в ограниченном об'еме невозможно дать даже хоть сколько-нибудь полного изложения различных методов работы, применяемых в микрофотографии. Исходя из этих соображений, автор попытается изложить только самые важные основные моменты, знание которых необходимо для лиц, решающих заниматься микрофотографией. Что же касается детального изложения предмета, отсылаем читателя к литературе, приведенной в конце этой главы, в которой можно многое почерпнуть; желающий сделать микрофотограмму, найдет там все, что ему может быть полезно.

Поле деятельности для микрофотографа, как уже упомянуто выше, огромно. В гистологии, бактериологии, патологии и других научных областях уже давно пользуются услугами микрофотографии; новыми областями применения являются минералогия и металлография. Для работ в последней области пользуются микроскопами особой конструкции, а также специальными осветительными установками, с помощью которых можно надлежащим образом освещать снимаемые, т. е. исследуемые, травленые или полированые, пробы металлов; эти аппараты подробно описаны в предыдущей главе.

## Микрофотография при слабом увеличении

Можно делать микрофотограммы и не пользуясь микроскопом — с помощью камеры с достаточно большим растяжением и короткофокусным об'ективом. Для большинства работ достаточна камера размером 13 × 18 *см*, если она имеет тройное растяжение и если кассеты ее снабжены вкладами для размеров 9 × 12 *см*. На основании личного опыта автор рекомендует пользоваться пластинками формата 9 × 12 *см*, так как они дешевле, кроме того с них удобно путем простого копирования делать диапозитивы (8,5 × 8,5 *см*). Автор для собственного употребления сконструировал очень удобное проверочное приспособление, которое он вкладывает в заднюю часть своей камеры размером 13 × 18 *см*. С помощью этого приспособления можно получить два снимка одного и того же об'екта на одной пластинке формата 9 × 12 *см*. В этот прибор закладывается простая металлическая кассета форматом 9 × 12 *см*; на вставленной в кассету пластинке делается два снимка, из которых один экспонируется примерно вдвое больше другого или один делается с фильтром, а другой без фильтра. После проявления видно, какой из снимков больше подходит. Этот способ повидимому обладает некоторыми преимуществами. При условии, что все манипуляции проведены правительно,—это облегчается тем, что в упомянутом приборе предусмотрена соответствующая диафрагма, — получается два снимка (негативы) формата 6 × 9 *см*, которые вполне годны для

непосредственного копирования с них диапозитивов (проекционных изображений). Упомянутый прибор очень удобен также и в опытах с освещеиием.

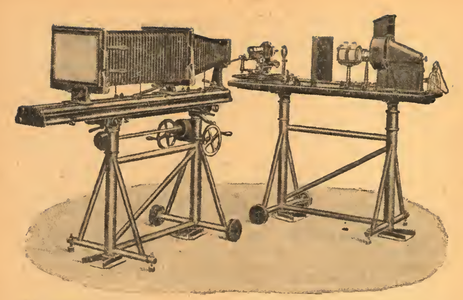
Пользуясь об'ективом с фокусиым расстоянием около 100 *мм*, укрепленным иа откидиой доске камеры 13 $\times$ 18 *см*, при растяжении, равном 50 *см*, можио получить 4-кратное увеличение. При том же растяжении об'ектив с фокусным расстоянием в 75 *мм* дает 6-кратное увеличение и об'ектив с фокусиым расстоянием в 50 *мм* при одинаковых прочих условиях дает 8-кратное увеличение.

В настоящее время в распоряжении микрофотографа имеется целый ряд специальных фотографических об'ективов, снабженных особой нарезкой (R.-M.-S.[1]) для микроскопов и скоиструироваииых по принципу наиболее употребительных фотографических анастигматов. Такие об'ективы применяются для получения слабого увеличения (либо в соединении с микроскопом либо без него), отличаются от иастоящих микроскопических об'ективов наличием сравнительно большого плоского поля изображения и превосходят их глубиной фокуса. Оии снабжены ирисовой диафрагмой, могущей сокращаться (в целях увеличения глубины фокуса) до требуемых размеров. Увеличение глубины фокуса необходимо, когда фотографируемый об'ект обладает на разных глубииах сечения сильио выраженным различием структуры. Общеизвестно, что умеиьшение отверстия об'ектива может повысить глубину фокуса. При работе с обычным об'ективом микроскопа, как известно, ради разрешающей способности жертвуют глубииой фокуса. Для с'емки небольших предметов, обладающих определенным протяжением в глубину, особенно когда эти предметы освещены п а д а ю щ и м (а ие проходящим) светом, очень удобны различные специальные об'ективы (иапример микропланар К. Цейсса, микросуммары Е. Лейтца, соответствующие специальиые об'ективы А. Бротерса в Бирмингаме и др.), которые выпускаются с фокусными расстояниями в 25, 50, 75 и 100 *мм*. Эти об'ективы — отличио астигматически коррегированные системы; их можно помещать или в микроскоп или на откидной доске камеры; они охватывают большое поле изображения.

Для микрофотографической с'емки с малым увеличением пользуются камерой или в горизонтальиом или вертикальном положении; в первом случае камера привинчивается к доске (подставке) или же плотно закрепляется на ней для того, чтобы она оставалась неподвижиой во время с'емки. На доске также предусмотреио место для устаиовки источиика света, коллекториой смотрено место для установки источника света, коллекторной подобном случае работают при искусственном свете.

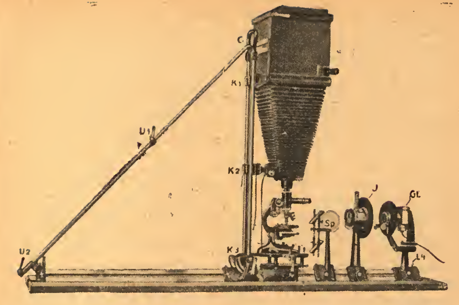
В иекоторых случаях рекомендуется располагать камеру вертикально, например когда требуется сфотографировать предмет, спокойно лежащий в жидкости (рис. 142). Имеется миого всевозможиых готовых приспособлений, с помощью которых придается вертикальиое положение камере, ио и самостоятельиое изготов-

[1] Royal Microscopical Society.



**140.** Камера $24 \times 30$ *см* с большим растяжением. Стол и оптическая скамья. Установка с микроскопом в вертикальном положеиии и с вертикальиым осветителем

**141.** Большой микрофотографический аппарат ИМА с приспособлениями для раздвижеиия




**142.** Микрофотографический аппарат ИМА с вертикально поставленной камерой. Обращает внимание система зеркал Sp

ление их не требует большого умения. В качестве подставки для об'екта больше всего подходит стеклянная пластинка. Окрашенный картон или кусок черного бархата, помещенные на некотором расстоянии от стеклянной пластинки, являются очень хорошим фоном для об'екта.

При вертикальном расположении камеры для освещения пользуются дневным (солнечным) светом или же искусственным освещением.

Свет концентрируется на об'екте при помощи конденсора (простой собирательной линзы). Для менее трудных с'емок не требуется особенно сильного источника искусственного света; часто можно удовлетвориться газовой горелкой или обыкновенной лампой. При горизонтальном расположении камеры можно также просвечивать об'ект насквозь. В этом случае между об'ектом и источником света помещается простая плосковыпуклая линза или конденсор, взятый из проекционного аппарата. Конденсор ставится позади об'екта на штативе (в качестве последнего можно воспользоваться любым из обыкновенных держателей для диапозитивов) на такой высоте, чтобы его оптическая ось совпадала с оптической осью с'емочного об'ектива. Источник света центрируется таким образом, чтобы матовое стекло получило равномерное освещение. Основным условием получения безукоризненных снимков является тщательное центрирование всей системы. Фотографируемый об'ект передвигается (вверх и вниз, влево и вправо, вперед и назад) до тех пор, пока его изображение на матовом стекле займет требуемое положение и будет достаточно резким; точная наводка на резкость производится путем растяжения и

складывания меха камеры. Для окончательной наводки изображения на матовое стекло пользуются хорошей лупой. Часто приходится уменьшать интенсивность применяемого света или заботиться о том, чтобы исчезло возникающее иногда на месте об'екта изображение источника света (петли светящейся сетки или нити электрической лампы накаливания). Это достигается включением на пути лучей света очень мелкозернистого матового стекла, придвигаемого по возможности ближе к источнику света. Эта мера связана конечно с удлинением времени экспозиции, так как матовое стекло довольно сильно снижает интенсивность света.

При экспозиции сначала выдвигается крышка кассеты; после того как вызванные этим движением неизбежные сотрясения (вибрации) прекратятся, с об'ектива снимают крышку или, если ею не пользуются, отнимают черный картон, поставленный перед об'ективом. Последняя операция очень проста и даже вызывает меньше сотрясений, чем при пользовании очень хорошо выполненным затвором.

При пользовании падающим светом источник света ставится сбоку камеры с таким расчетом, чтобы в об'ектив не мог непосредственно попадать свет. Для концентрирования света на об'ектив пользуются подходящей собирательной линзой, которую закрепляют в держателе и устанавливают в таком положении относительно об'екта и источника света, которое аналогично описанному выше при проходящем свете.

Наводка изображения на матовое стекло и экспозиция производятся в этом случае совершенно так же, как было описано выше. При пользовании падающим светом время экспозиции больше, чем при пользовании проходящим, и иногда оно довольно значительно. В некоторых случаях вероятно удобнее направить на фотографируемый непрозрачный об'ект свет с помощью зеркала, чем достигается равномерность освещения и устраняются нежелательные тени. В общем же можно рекомендовать по возможности не прибегать при с'емке ни к каким необычным приспособлениям.

При фотографировании непрозрачных для света об'ектов возникает много затруднений, так как от черной бумаги, обыкновенно подкладываемой под эти об'екты, всегда отражается немного света. Даже в самой гладкой бумаге при рассмотрении в лупу можно обнаружить довольно грубое зерно, определенно мешающее с'емке. Искажений, обусловленных этим зерном, можно избегнуть, если снимаемый непрозрачный об'ект положить на стеклянную пластинку, а последнюю — на другую пластинку, нижняя поверхность которой покрыта черным лаком; таким путем об'ект приобретает фон, практически не имеющий никакого зерна. Вместо покрытого черным лаком стекла лучше воспользоваться куском стекла красного (т. е. фотографически неактиничного) цвета, тоже дающим темный и удобный фон. Если по каким-либо соображениям рекомендуется белый фон, то пользуются куском опалового стекла; его приклеивают с обратной стороны предметного стекла (на котором лежит об'ект). Белая под-

ложка такого рода значительно лучше белой бумаги или картона, так как последние при рассматривании в лупу обнаруживают зернистое строение. Эти, на первый взгляд незначительные детали оказывают очень существенное влияние на то впечатление, которое в конечном итоге производит готовый микрофотографический снимок.

Продолжительности экспозиции мы коснемся подробнее при изложении микрофотографии с помощью микроскопа. Ввиду того что упомянутые нами специальные об'ективы принадлежат к большой группе обыкновенных фотографических об'ективов, освещение при пользовании именно этими об'ективами подчиняется основным фотографическим правилам. Опытный фотограф по яркости изображения на матовом стекле сможет приблизительно определить необходимое время экспозиции.

В последнее время выпущен очень практический микрофотографический прибор: микрофотографическая насадка к камере по Свифту-Вилеру. Он состоит из тубуса микроскопа, укрепляемого на откидной доске фотографической камеры (вместо об'ектива). Этот прибор годится для всех микрофотографических работ при слабом увеличении (до 150 раз); пользование им очень несложно.

## Микрофотография при сильном увеличении. Микрофотография при помощи микроскопа

Когда требуется приготовить хорошие микрофотограммы при посредстве микроскопа, надо располагать микроскопом, обладающим целым рядом особых свойств, с которыми необходимо очень считаться.

Прежде всего штатив микроскопа должен быть устойчивым и сконструированным таким образом, чтобы при приведении тубуса в горизонтальное положение штатив не грозил опрокинуться. Английский треногий штатив следует в этом отношении, по мнению автора, предпочесть подковообразному штативу, принятому на континенте. Приспособления для грубого и микрометрического передвижения тубуса должны быть выполнены очень тщательно. Они не должны ни дрожать, ни работать на холостом ходу, потому что безукоризненный снимок большей частью зависит от длительной резкой установки изображения. Ясно, что микроскоп, не удовлетворяющий указанным требованиям, будет доставлять его обладателю постоянные огорчения. Тубус микроскопа должен иметь в длину не менее 160 *мм* и состоять из двух частей, т. е. в нем должна иметься выдвижная трубка с разделенной на миллиметры шкалой, передвигаемая посредством зубчатой передачи. Деления позволяют отсчитать в каждом случае полную механическую длину тубуса. Предпочтительнее пользоваться широким тубусом микроскопа (диаметром около 50 *мм*); нормальный диаметр тубуса (около 32 *мм*) слишком мал для микрофотографических целей.

Величина диаметра тубуса не имеет основного значения, однако играет некоторую роль, так как широкий тубус, особенно при

работе без окуляра, дает ряд преимуществ (бо́льшие размеры проектируемого кружка и т. д.).

Внутренняя поверхность тубуса должна быть матово вычернена, так как иначе возникают рефлексы, вредно отражающиеся на качестве изображения. Поэтому некоторые микрофотографы рекомендуют оклеивать тубус внутри черным бархатом или сукном.

Предметный столик должен иметь достаточно большие размеры. Обычно при микрофотографических работах употребляется вращающийся предметный столик, но это вовсе не обязательно. Об'ект зажимается в нужном положении клеммами. Отверстие столика должно быть большим.

Осветительному аппарату, движущему его механизму и выдвижной гильзе следует уделить несколько слов ввиду того, что хорошему освещению принадлежит основное значение в микрофотографии. Прежде всего устройство осветительного аппарата должно позволять приближать и удалять его от нижней поверхности об'екта: в этих целях он сделан подвижным с помощью зубчатой передачи. Ясно конечно, что для этого движения вверх и вниз должно быть предусмотрено достаточно свободного места, конденсор должен центрироваться. Последнее условие имеет решающее значение для безукоризненного освещения об'екта. К осветительному аппарату относятся: ирисовая диафрагма, приспособление для закрепления светофильтров и наконец центральная диафрагма для освещения при общем затемненном поле.

Нижняя часть осветительного аппарата должна отводиться в сторону. Конденсор должен обладать средней величины апертурой ($A$), его верхняя часть должна быть свинчивающейся. Взятая сама по себе нижняя часть действует, как конденсор малой апертуры, употребляемый при работе со слабыми об'ективами. Зеркало для микроскопа с одной стороны плоско, а с другой — вогнуто и должно поворачиваться. Для отражения параллельного пучка лучей пользуются плоской, а для сходящегося — вогнутой поверхностью зеркала, хотя последняя редко используется для целей микрофотографии.

## Об'ективы

Выбор об'ектива обусловлен характером производимой работы. Так например бактериологу требуется об'ектив-апохромат (сухая иммерсионная система), т. е. оптическая система, очень хорошо исправленная как в сферическом, так и в хроматическом отношении и потому дающая изображения, пригодные для последующего сильного увеличения. Апохромат при прочих равных условиях в силу своей большой численной апертуры дает более яркие изображения (без цветных ошибок), чем ахромат. При работе с апохроматом глазу приходится меньше напрягаться, чем при работе с ахроматом.

Дешевле, чем апохроматы, стоят так называемые полуапохроматы, или флюоритовые системы. Они пригодны как для сильных увеличений, так и для снимков в сравнительно трудных условиях, и так как для их изготовления идет флюорит

(плавиковый шпат), они превосходят обычные ахроматы в отношении хроматической исправленности. В то же время, хотя флюоритовые системы исправлены только с расчетом совпадения двух цветов и потому по качеству уступают апохроматам, все же с помощью их получаются снимки, не на много уступающие получаемым при посредстве апохроматов.

Новейшие ахроматические об'ективы хроматически исправлены таким образом, что лучи двух определенных цветов (длин волн) соединяются в одной точке; кроме того у них устранена оптическая аберрация для одного цвета. Эти об'ективы в первую очередь предназначены для визуального наблюдения, но дают также отличные микрофотограммы, особенно при пользовании монохроматическим светом или подходящим фильтром. При соблюдении определенных условий с помощью ахроматических об'ективов хорошей конструкции можно добиться снимков, едва ли уступающих снимкам, получаемым с гораздо более дорогостоящими апохроматическим об'ективами. Поле изображения ахроматического об'ектива гораздо больше приближается к плоскости, чем у апохромата, который всегда должен применяться в комбинации с компенсационным окуляром.

Начинающий, если он хочет научиться получать безукоризненные микрофотографические снимки, не должен начинать с работ, требующих больших увеличений, а должен итти постепенным путем, т. е. сначала работать с более слабыми об'ектами и только постепенно переходить к сильным увеличениям. С набором ахроматических об'ективов с фокусным расстоянием в 75, 40, 8 и 4 *мм* (об'ектив с фокусным расстоянием в 4 *мм* должен по возможности представлять собой флюоритовую систему) можно добиться очень хороших результатов. После того как удастся научиться безукоризненно работать с такими линзами, можно перейти к более трудным задачам и применять об'ективы с еще более коротким фокусным расстоянием. Из двух об'ективов с одинаковым фокусным расстоянием, но с разной численной апертурой (*A*), наилучшей разрешающей силой будет обладать об'ектив с большей апретурой (*A*). Поэтому, несколько набив руку, пополняют вышеупомянутый набор об'ективов однородной масляной иммерсией с фокусным расстоянием в 2 *мм*.

## Окуляры

В распоряжении микроскописта, как известно, имеется много окуляров. Микрофотограммы делаются или с помощью окуляра или без него. При применении окуляра достигается более сильное увеличение, но той же цели можно достигнуть и без окуляра, избрав вместо этого более короткофокусный об'ектив или более сильное растяжение камеры. Окуляры, применяемые в соединении с ахроматическими об'ективами, большей частью устроены по типу гюйгенсоновских, т. е. состоят из двух, не исправленных хроматически, плосковыпуклых линз. Отдельные окуляры имеют различную оптическую силу и смотря по величине последней, обозначаются различными номерами или буквами. Чем сильнее

примененное увеличение, тем слабее яркость конечного изображения и тем сильнее заметны в нем все ошибки об'ектива.

Апохроматические об'ективы применяются обычно с особым, так называемым компенсационным окуляром, иногда называемым также коррекционным. Назначение — уничтожить остающуюся еще в апохроматах неисправленной хроматическую разность увеличения. Особым типом окуляра является проекционный окуляр, построенный специально для микрофотографических работ. Этим типом окуляра пользуются для получения относительно слабо увеличенных снимков и, как явствует из самого наименования, только для действительных (немнимых) проекций, а не для визуального рассматривания об'екта. Обычно употребительны две «силы» такого окуляра: 2$\times$ и 4$\times$; последняя из них употребляется чаще. Проекционными окулярами пользуются в комбинации с ахроматами и апохроматами.

Следует отметить, что апохроматический об'ектив допускает применение значительно более сильного компенсационного окуляра, чем ахромат. Более сильные ахроматические об'ективы с большой апертурой (с фокусным расстоянием от 4 *мм* и меньше) обычно хроматически недоисправлены и дают лучшие по качеству микрофотографические изображения в тех случаях, когда вместо соединения их с обыкновенным гюйгеновским окуляром ими пользуются в комбинации с компенсационным или проекционным окуляром.

Новые холоскопические окуляры (Уатсона) путем соответствующего изменения расстояния образующих их групп линз могут быть приспособлены к любому ахроматическому или апохроматическому об'ективу.

Автору не пришлось много работать с этим типом окуляра, и потому он затрудняется категорически высказаться о его качестве.

Располагая 12-кратным компенсационным окуляром и тремя обыкновенными гюйгенсовскими окулярами с 4-, 6- и 8-кратным увеличением, можно вполне успешно выполнить большинство микрофотографических работ и получить все обычно необходимые увеличения.

## Микрофотографическая камера

Для микрофотографических работ обычно применяется камера размером 13 $\times$ 18 *см* и 9 $\times$ 12 *см*. Выше мы уже подробно разобрали целесообразное монтирование такой камеры, которое удобно и при работе в соединении с микроскопом. Пользование камерой значительно большего размера может понадобиться только в специальных случаях.

При выборе специальной микрофотографической камеры целесообразнее остановиться на типе камеры, мех которой имеет квадратное сечение и может быть растянут до 1 *м*. Рамка матового стекла должна поворачиваться посредством соответствующего приспособления в задней части камеры; это очень удобно при работе.

Выбору матового стекла следует уделить много внимания. Обычные матовые стекла, которыми снабжены нормальные камеры, не пригодны для наших целей, так как в микрофотографии приходится делать наводку изображения чрезвычайно тонкого строения.

Некоторые микрофотографы пользуются для наводки изображения прозрачной стеклянной пластинкой и установочной лупой, с помощью которой можно наводить на «мнимое изображение».

Автор предпочитает этому тонко травленую матовую пластинку, на которой выступает несколько светлых (прозрачных) полосок. На этих светлых местах с помощью установочной лупы наблюдают это изображение. Рекомендуется наносить такие отдельные прозрачные места не только в средней части матового стекла, но и по всей его поверхности, так как этим приемом достигается чрезвычайно точная фокусировка изображения. Такое матовое стекло обладает следующими преимуществами: 1) невооруженный глаз на травленых участках матового стекла может рассмотреть все изображение и установить, равномерно ли и достаточно ли освещение об'екта; 2) пользуясь прозрачными местами и установочной лупой и наводя на мнимое изображение, можно добиться очень точной наводки.

Очень удобно, когда на матовом стекле ($13 \times 18$ *см*) отмечены различные форматы пластинок ($9 \times 12$ *см*, формат диапозитивной пластинки и т. д.) и несколько кругов. На передней поверхности матового стекла (обращенной к об'ективу) посредине центрального прозрачного участка выгравировывается очень тонкими линиями крест. (Передняя поверхность матового стекла по своему положению совпадает с поверхностью светочувствительного слоя пластинки, когда последняя находится в кассете.) Выгравированный крест служит для фокусирования установочной лупы. Когда в лупу одновременно с одинаковой резкостью виден и крест и фотографически фиксируемое изображение, можно с уверенностью утверждать, что изображение точно наведено на матовое стекло. При очень сильных увеличениях яркость изображения так мала, что точная его установка с помощью обычного матового стекла почти невозможна. Тот, кому до этого не приходилось делать наводки, пользуясь мнимыми изображением, должен постепенно привыкнуть к этому способу фокусирования.

Обыкновенное мелкозернистое матовое стекло можно превратить в матовое стекло с прозрачными местами следующим простым способом: в тех местах матированной поверхности, которые хотят сделать прозрачными, канадским бальзамом приклеиваются чистые покровные стекла. До наклейки покровного стекла на матированной поверхности стекла остро отточенным карандашом ставится крест (посреди участка). Канадский бальзам предназначен для того, чтобы заполнить поры матированной поверхности и сделать ее прозрачной. Если приходится работать с обыкновенным матовым стеклом, то лучше слегка смазать его вазелином, тогда оно становится прозрачнее. Чрезвычайно удобное матовое стекло можно приготовить следующим образом: очень коротко

или, вернее, слабо освещают фотографическую пластинку и проявляют в проявителе, не дающем пятен, до тех пор, пока она не покроется серым налетом; затем ее фиксируют в растворе гипосульфита и промывают. В качестве источника света при этом достаточна восковая спичка, сожженная на расстоянии 1 *м* от пластинки. Если и на таком матовом стекле желательно получить прозрачные места, то поступают следующим образом: светочувствительная пластинка до освещения покрывается прозрачной стеклянной пластинкой, заклеенной кусочками черной бумаги в тех местах, которые в матовом стекле должны остаться прозрачными; если после высыхания пластинки выкупать ее еще в растворе иода и после этого в разбавленном аммиаке, то серебряный осадок пластинки почти не будет иметь зерна; получается матовое стекло, значительно более пригодное для точной наводки, чем покупные матовые стекла.

В микрофотографических установках, в которых микроскоп может быть отведен от оптической оси фотографической камеры (такую установку можно очень рекомендовать, так как она облегчает возможность визуального наблюдения об'екта), сзади камеры следует поместить белый картонный кружок таким образом, чтобы он находился в одной плоскости с матовым стеклом (перпендикулярно к оптической оси всей системы). Когда микроскоп снова возвращается в прежнее положение, то на этом картонном кружке проектируется то же изображение, что и на матовом стекле камеры.

Такой непрозрачный экран дает возможность легко и удобно определить, равномерно ли и достаточно ли освещен снимаемый об'ект, хорошо ли центрирован под предметным столиком конденсор, и наконец в тех случаях, когда применен проекционный окуляр, достаточно ли точно установлена проекционная система относительно своей диафрагмы.

Передняя часть микрофотографической камеры должна быть устроена таким образом, чтобы в нее можно было вставлять различные об'ективные доски с центральным отверстием. Одна из об'ективных досок должна быть снабжена об'ективным кольцом для английского шарнира микроскопа и служить для помещения в нем слабого об'ектива микроскопа, которым пользуются при с'емке, когда хотят обойтись без использования всего микроскопа. Вторая об'ективная доска снабжена об'ективным кольцом для помещения короткофокусного фотографического об'ектива. Третья об'ективная доска имеет центральное отверстие, диаметр которого несколько превосходит диаметр одного из окуляров микроскопа. Это отверстие лежит точно посредине об'ективной доски, т. е. оно концентрично с осью камеры и устроено таким образом, чтобы в него можно было поместить верхнюю часть окуляра или тубус микроскопа (при с'емке без окуляра). При этом окуляр не должен плотно входить в это отверстие, а между краями отверстия и окуляром должен оставаться некоторый промежуток. Это обстоятельство очень важно для предотвращения сотрясения всей установки и вообще дает хорошие результаты при практической работе.

Далее следует позаботиться о том, чтобы об'ективная доска легко сдвигалась вправо, влево и в стороны. Затем важно, чтобы во время с'емки между камерой и микроскопом существовало светонепроницаемое соединение; оно осуществляется или с помощью непроницаемого для света бархатного рукава или же, еще лучше, тем, что на об'ективной доске камеры укрепляется жесткая картонная крышка-гильза высотой около 25 *мм*, диаметром несколько превосходящая диаметр отверстия в об'ективной доске, предназначенного для об'ектива. С другой стороны, по тубусу микроскопа свободно скользит цилиндрическая гильза, на которую наклеена другая гильза, бо́льших размеров. Диаметр последней немного превышает диаметр гильзы на об'ективной доске и скользит по ней, как хорошо пригнанная крышка по коробке. Обе гильзы вычернены внутри для того, чтобы было совершенно исключено отражение света от стенок гильз. Описанное устройство для светонепроницаемого соединения микроскопа с камерой значительно удобнее бархатного рукава, при пользовании которым всегда возможны смещения частей аппарата относительно оптической оси всей системы.

Мы уже раньше при описании микрофотографии без помощи микроскопа упомянули, что камера может быть расположена горизонтально или вертикально; при пользовании микроскопом тоже возможны оба эти положения камеры.

## Установка микрофотографической аппаратуры

Многие — обычно очень дорогие — аппараты можно по желанию применять в горизонтальном или вертикальном положении, в то время как другими аппаратами можно пользоваться только в одном из названных положений. Выбор той или иной аппаратуры зависит от характера выполняемой работы.

Автор в своих работах пользовался аппаратурой, собранной им самим, и всегда получал хорошие результаты.

Доска, служащая основанием для горизонтально расположенной микрофотографической аппаратуры, должна быть прочной, изготовленной из сухого дерева; длина доски около 1,5 *м*, ширина 30 *см* и толщина от 2,5 до 3 *см*. На одном из концов этой доски с помощью винта укрепляется вторая доска длиной около 1 *м*, шириной 40 *см* и толщиной 2 *см*, которая может легко вращаться относительно первой доски. На первой доске размещаются микроскоп, источник света, коллекторная система и т. д. На второй доске монтируется фотографическая камера, которая путем вращения доски легко может быть отведена в сторону от оптической оси микроскопа. Таким путем осуществляется упомянутое выше визуальное рассматривание фотографически фиксируемого об'екта, при котором можно контролировать, достаточно ли ярко освещен об'ект; кроме того можно удобно выбрать подлежащую с'емке часть об'екта. Все эти подробности лучше и легче определять и оценивать путем визуального наблюдения, чем рассматривая изображение, спроектированное на матовом стекле. Помещенный на второй доске юстируемый угломер может гаран-

тировать, что при возвращении на место отведенной вбок доски оптическая ось фотографической камеры снова точно совпадет с оптической осью микроскопа, т. е. что вся система (источник света, коллектор, микроскоп, камера) будет снова точно центрирована.

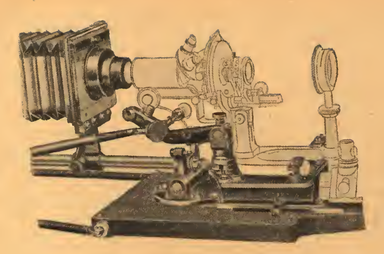
Для облегчения центрирования всей аппаратуры штатив микроскопа скользит по первой доске между двумя привинченными направляющими полосами. По тем же соображениям и для прочих частей аппаратуры (источника света, коллекторной системы, кюветы с водой, отражателя для фильтров) тоже предусмотрены направляющие планки. Безукоризненное центрирование всей системы имеет основное значение для успешной работы. Оптическая ось всей системы должна быть перпендикулярна к плоскости матового стекла.

Камера укрепляется, как это упомянуто выше, на второй доске; ее оптическая ось должна совпадать с оптической осью остальной системы, как только обе доски выпрямлены (до отказа). Мех камеры должен располагать достаточным пространством для своего движения, т. е. должно быть возможно достаточное перемещение его вперед и назад. Передвижение передней части меха требуется для осуществления светонепроницаемого соединения камеры с микроскопом, передвижение задней части меха предназначено для точной наводки изображения на матовое стекло.

Если расстояние меха превышает 0,5 *м*, то точная наводка микроскопа с одновременным наблюдением изображения на матовом стекле невозможна. В этом случае пользуются так называемой «наводкой на расстоянии», осуществляемой с помощью сочленения Хука (жесткое) или же посредством гибкого вала. (Имеется много типов таких приспособлений.) Один конец этого приспособления соединен с микрометрической частью микроскопа, а второй находится в непосредственной близости от матового стекла так, чтобы во время наблюдения изображения на матовом стекле было удобно им оперировать (рис. 143). Это приспособление должно быть легко подвижно; его движение не должно иметь мертвых точек и вызывать сотрясения и смещения микроскопа вбок; для устранения этих дефектов пользуются различного рода компенсирующими противовесами. Когда микроскоп отводится вбок от оптической оси всей системы, описанное приспособление приходилось бы выключать у микрометрического винта; во избежание этого его длинная штанга делается из двух частей, которые в упомянутом случае приходится только отделить друг от друга, благодаря чему отпадает необходимость всяких манипуляций около микрометрического винта.

На доске, (подставке) рекомендуется нанести масштаб, по которому можно было бы прочитывать длину растяжения камеры и определять таким образом увеличение изображения и следовательно необходимую продолжительность экспозиции.

Качество полученного фотографического изображения в значительной мере зависит от аппаратуры, с которой работа проделана. Одним из основных условий является устранение колебаний аппаратуры во время экспозиции или по меньшей мере све-



**143.** Наводка микроскопа на расстояние (ключ Хука)

дение их до минимума. Поэтому надо выбирать устойчиво построенные микроскоп и камеру, а солидных размеров доску, служащую основанием всего инструментария, следует ставить на прочный стол на крепких ножках. Автор подкладывал под доску своего аппарата две войлочные или резиновые подстилки, заглушающие колебания (подстилки подложены под концы доски); это мероприятие дало хорошие результаты. Известно много способов предотвращения и уменьшения колебаний микрофотографической аппаратуры: работа в подвале, а не в одном из верхних этажей здания, установка аппаратуры в помещении с бетонированным полом, подвешивание всего прибора под потолок рабочего помещения и т. д. Но и без всех этих мер предосторожности можно получить хорошие результаты при условии тщательной работы. Как нужно экспонировать и каким образом создать светопроницаемое соединение микроскопа с камерой, описано нами выше.

В одном из предыдущих отделов мы говорили, что камерой можно пользоваться и в вертикальном положении. В продаже имеются различные аппараты такого рода. Штатив камеры может быть деревянным. Камера, устанавливаемая на любой высоте штатива, в соответствующем месте скреплена с окуляром вертикально поставленного микроскопа. Вертикально установленный аппарат, о котором мы говорили раньше, когда речь шла о микрофотографии без микроскопа, может быть применен также и в соединения с микроскопом, только в этом случае стеклянная основная пластинка должна быть удалена. При микрофотографировании в проходящем свете с вертикальной камерой пользуются зеркалом микроскопа для освещения об'екта совершенно так же, как это делается при визуальном наблюдении в микроскоп. В этом смысле способ микрофотографической работы с вертикальной камерой отличается от способа работы при горизонтально

установленной камере, так как в последнем случае изображение источника света проектируется собирательной системой в место, где находится об'ект (таким образом в этом случае зеркало неприменимо).

## Источники света

### Керосиновая лампа

В глухих местах, где часто нет ни газа, ни электрического тока, приходится использовать в качестве источника света керосиновую лампу. Свет обыкновенной керосиновой лампы вполне приемлем в микрофотографии; снимки, сделанные при этом свете, получаются удовлетворительные. Ввиду того что пламя керосиновой лампы обладает малой яркостью, при пользовании ею приходится довольно сильно удлинять экспозицию. Фитиль керосиновой лампы должен быть плоским. Надо брать керосин лучшего качества и добавлять к нему несколько кусочков камфары, что повышает яркость пламени. С помощью такой лампы можно добиться даже довольно сильных увеличений, если для освещения об'екта пользоваться краем пламени, который обладает значительно большей яркостью, чем плоская центральная часть пламени. Последней пользуются при получении слабо увеличенных снимков.

### Ацетиленовый газ

Пользуются или простой, портативной ацетиленовой лампой, какие применяются в автотранспорте, или же получают газ в особом генераторе. Ацетиленовый газ дает свет более интенсивный и более актиничный, чем керосиновая лампа. Этот газ распространяет неприятный запах и чистка резервуаров для карбида после употребления сопряжена с трудностями, поэтому такой источник света не получил широкого распространения, хотя с ним можно получать отличные микрофотографии. Яркость ацетиленового пламени почти в 10 раз больше яркости пламени керосиновой лампы.

### Друммондов свет

Кислород и водород, находящиеся в сжатом состоянии в стальных бомбах, подводятся в соответствующе сконструированных горелках к диску или штифту из мела или тория и зажигаются. Пламя горящего водорода нагревает мел до белого каления и превращает его в источник света большой интенсивности, достаточный для самых сильных увеличений. Газы либо непосредственно поступают в горелку простого устройства, в которую прямо открываются трубки, идущие от стальных бомб, либо до поступления в горелку они смешиваются в особом небольшом резервуаре. Применяют или названные выше газы, или, если в распоряжении имеется светильный газ, вместо водорода пользуются светильным газом из общей газовой сети. Для питания горелки газом

существуют особо сконструированные вентили и краны, назначение которых состоит в поддержании в смеси требуемого соотношения обоих газов (вентили Борда и Прингле). В зависимости от типа горелки друммондов свет дает яркости от 500 и до 2 000 свечей.

В последнее время В. О. Бисс предложил аналогичный очень актиничный источник света, удобный для микрофотографических целей: из отверстия очень узкой горелки выбрасывается пламя светильного газа на небольшой шарик из тория, величиной в горошину. Этот источник света практически очень удобен; при освещении этим светом удается получить превосходные микрофотограммы (он также очень хорош для освещения при визуальном наблюдении в микроскоп). Его можно рекомендовать и при отсутствии газопровода; в последнем случае светильный газ поступает в сжатом виде из стальной бомбы.

### Газокалильное освещение

Газокалильное освещение с подвешенной накаленной сеткой является вполне приемлемым источником света для микрофотографии. Этот вид освещения прост и удобен в пользовании, но страдает тем недостатком, что развивает много тепла. При пользовании этим источником света в месте нахождения об'екта иногда появляется изображение петлей сетки. Указанное неудобство преодолевается включением на пути лучей, идущих от источника света, матового стекла и раздвижной (ирисовой) диафрагмы. Этот источник света особенно пригоден для слабых увеличений; яркость его приблизительно соответствует яркости ацетиленового пламени и зависит, во-первых, от степени изношенности тела накаливания, во-вторых, от давления и, в-третьих, от теплотворной способности газа. В зависимости от изменения перечисленных свойств газа и тела накаливания меняется и интенсивность света.

### Электрические источники

Если имеется в распоряжении электрический ток, в особенности постоянный, то электрическое освещение следует без колебаний предпочесть всякому другому, так как оно очень надежно и с ним очень удобно работать. Пользоваться электрическим током можно различными способами.

*Лампа Нернста.* Она дает свет, очень удобный для целей микрофотографии. Однако надо заметить, что светящиеся штифты и проволочки лампы Нернста довольно хрупки и требуют очень осторожного и внимательного отношения. Светящаяся поверхность штифта Нернста мала, а поверхностная яркость очень велика и постоянна. Как уже отмечено, этот источник света очень удобен для микрофотографии, хотя все же не может конкурировать с дуговым освещением. Лампа Нернста с одним светящимся штифтом при напряжении в 100 V обладает в 10 раз большей актиничностью, чем обыкновенная керосиновая лампа; при

напряжении в 240V сила света лампы утраивается по сравнению с силой света лампы при 100 V. Другим очень простым электрическим источником света для микрофотографических целей является обыкновенная *электрическая лампа накаливания* с металлической нитью силой около 30 НК, снаружи целиком высеребренная за исключением небольшого участка диаметром около 15 *мм*. Прозрачная, невысеребреная, часть лампы матируется фтористоводородной кислотой или покрывается матовым лаком. Прямо выходящий изнутри лампы свет усиливается отраженным светом, и потому матированный участок поверхности лампы дает очень интенсивный свет. Высеребренная таким образом лампа с металлической нитью силой в 30 НК в отношении даваемой ею силы света приблизительно соответствует штифту Нернста при напряжении в 100 V и силе тока в $^1/_4$ А. В своих микрофотографических работах автор почти всегда пользовался лампой описанного типа, исключая случаев, когда требовалась более высокая сила света и потому предпочтительнее была дуговая лампа. Высеребренные лампы являются превосходными источниками света и для увеличительных аппаратов. Необходимо однако добавить, что серебрение лампы (одним из употребительных способов серебрения стекла) и последующая защитная лакировка серебреного слоя представляют довольно кропотливую операцию.

Далее надо упомянуть о различных типах *газонаполненных ламп* с металлической нитью для проекционных целей (Osram, Берлин; General Electric Company, Лондон), со специальной формой металлических проволочных сеток, являющихся источниками света с малым поверхностным протяжением. Такие лампы можно также питать переменным током. Проекционная лампа General Electric Company рассчитана на напряжение в 100 V, но включенная последовательно с соответствующим сопротивлением она может гореть и в сети с нормальным напряжением. Автор имел возможность испробовать такую лампу и убедиться в том, что она наилучшим образом годится как для микрофотографических работ, так и для проекционного аппарата.

*Ртутная лампа*. Она состоит из пустотной стеклянной или кварцевой трубки с небольшим количеством ртути, налитой в нее. Этот источник света приводится в действие путем включения в обыкновенную осветительную сеть, большей частью с постоянным током (на нем она работает лучше). При работе с переменным током требуются специальные трансформаторы. Если наклонить трубку таким образом, чтобы ртуть потекла от положительного к отрицательному полюсу, ток замкнется. Ртуть начинает испаряться, и лампа зажигается. Свет ртутной лампы имеет спектр, состоящий всего из нескольких линий: при спектроскопическом исследовании обнаруживаются в основном три яркие спектральные линии, а именно: одна в желтом (5 790—5 760 Å), одна в зеленом (5 460 Å и одна в сине-фиолетовом (4 360 Å). Пользуясь определенными фильтрами, можно действовать каждой из этих линий в отдельности; таким путем получается монохроматический свет (свет узкого участка длин волн; общих данных о фильтрах

мы подробнее коснемся ниже). Но и без фильтра ртутная лампа является отличным источником света, не содержащим красных лучей, вследствие чего свет ее обладает меньшей средней величиной длины волны. Потребление тока такой лампой, как и потребление в ней ртути, мало, так как ртутные пары снова конденсируются, как только лампа выключается. Ртутная лампа удобна в обращении, и срок ее службы большой; правда, ее стеклянная или кварцевая трубка очень хрупка и потому требует осторожного обращения. Во время свечения лампа несильно нагревается. С помощью ее удается получить превосходные микрофотографические снимки, так как разрешающая способность об'ективов гораздо выше при пользовании коротковолновым светом. К этому остается добавить только следующее: необходимо всегда заботиться о том, чтобы отрицательный полюс лампы присоединялся к отрицательной клемме питающей проводки; закипание ртути при запрокидывании трубки служит признаком неправильного включения.

*Вольфрамовая газонаполненная лампа.* Газонаполненная вольфрамовая лампа выпущена на рынок сравнительно недавно. Она состоит из наполненной газом стеклянной колбы и небольшой вольфрамовой спирали, испускающей чрезвычайно яркий свет и дающей источник света с относительно малой поверхностью.

В вольфрамовой дуговой лампе (точечной лампе) в заполненном газом пространстве между вольфрамовым шариком (анодом), с одной стороны, и вольфрамовой проволокой (катодом) — с другой — зажигается небольшая дуга. Необходимое для нее сопротивление обычно вделано в цоколь лампы. (В зависимости от типа устройства лампа включается в сеть с постоянным или переменным током напряжением в 110—250 V.) Эта лампа очень удобна в пользовании, не требует никаких сложных схем включения и может быть использована с наилучшими результатами в микрофотографических работах. Дуговая вольфрамовая лампа дает свет в 150 НК. Актиничность ее света велика, а светящаяся поверхность ограничена и мала. В соединении с светофильтрами этот источник света удобно может быть использован для усиления и для ослабления контрастов.

*Электрическая дуга.* Этот источник света по целому ряду причин может быть признан идеальным для микрофотографических целей. Электрическая дуга обладает малой светящейся поверхностью большой яркости. Питаемая постоянным током, она не представляет ничего трудного в обращении и не требует никакого специального надзора. Правда, она несколько невыгодна экономически, так как сопротивление, необходимое для снижения нормального напряжения до 50—60 V, потребляет сравнительно много тока. Сильное тепловое лучеиспускание электричекой дуги тоже является ее недостатком. Для предохранения микрофотографической аппаратуры от излучаемого дугой тепла приходится прибегать к особому охладительному приспособлению (водяное охлаждение). При наличии толстых углей требуется ток силой в 30 А и выше, и потому нужна самостоятельная проводка.

К этому однако надо добавить, что с дуговой лампой в 4—5 А тоже можно получить освещение, вполне достаточное для микрофотографических целей. Такую лампу без всякого труда можно включать в нормальную комнатную проводку.

Дуговые лампы снабжены регулировкой или от руки или автоматической. Последняя практичнее и потому предпочтительнее. Оба угля дуговой лампы неодинаковой величины и присоединяются один к положительному, другой к отрицательному полюсу проводки. Соответственно этому они именуются положительными и отрицательными углями. Положительный уголь толще; при горении на нем образуется кратер (углубление); он сгорает гораздо быстрее отрицательного угля. Кратер положительного угля — место самого сильного свечения — в основном не должен изменяться во время горения углей. Положительный уголь обычно имеет фитиль, а отрицательный — чистый, однородный уголь. У большинства типов ламп оба угля расположены один над другим и наклонены к вертикали на 30°; меньший, отрицательный уголь находится внизу и обращен своим концом не на середину, а на край более толстого, положительного, угля; ввиду этого кратер разрастается вперед, т. е. в направлении п р о т и в оптической системы. В малых дуговых лампах (так называемых «лилипутах») применяются более тонкие угли, поставленные друг к другу под прямым углом. В этом случае положительный уголь, на котором образуется кратер, располагается горизонтально и имеет диаметр 8 *мм*, а отрицательный — 6 *мм*. (Оба угля имеют разную толщину для того, чтобы они сгорали приблизительно с одинаковой скоростью.) Если пользоваться переменным током, то оба угля могут быть одинаковой толщины. В этом случае толщина их может быть 6 *мм*. Закрытая дуга, более удобная при переменном токе, чем открытая, не рекомендуется в микрофотографии, так как стекло, окружающее дугу, мешает.

При пользовании светом раскаленного кальция или дуги необходимо в путь лучей света включать кювету с водой, назначение которой поглощать во время работы тепловое излучение источника света. При силе тока в 30 А достаточна толщина кюветы с водой в 7,5 *см*, а при силе тока в 5 А хватает толщины слоя воды в 2,5 *см*. При этих условиях оптическая система микрофотографической установки вполне предохранена от теплового излучения источника света.

Часто рекомендуется раствор квасцов в качестве сильного поглотителя тепла. Автору представляется сомнительным, чтобы раствор квасцов действовал значительно сильней чистой воды; вместе с тем им было обнаружено, что слабый раствор сернокислого железа действительно очень удобен для этих целей и потому его следует применять.

Кювета для воды должна быть сделана из безукоризненных в оптическом отношении вертикальных стеклянных пластинок с тем, чтобы, будучи помещена между собирательной системой и микроскопом, она не вызывала никакого нежелательного отклонения лучей.

## Выбор соответствующего освещения

### Общие данные о светофильтрах

Правильный подбор светофильтра для получения безукоризненных микрофотографических снимков гораздо важнее, чем какой-либо иной момент, например выбор типа аппарата и др. Так например, если вследствие недостаточно полной хроматической исправленности об'ектива микроскопа резкость изображений неудовлетворительна, можно существенно улучшить качество окончательно получаемого изображения, включая между источником света и конденсором микроскопа зеленое стекло. Соответственно подобранный фильтр поднимает до нужных пределов контраст; с помощью другого фильтра можно получить лучшую передачу деталей. Набор безукоризненных, испытанных спектроскопически фильтров является для микрофотографа надежным и очень удобно применимым средством для получения прекрасных результатов своей работы.

Фильтры бывают жидкие и сухие. Жидкие фильтры — это стеклянные сосуды, наполненные окрашенными растворами различного состава и концентраций. Сухие фильтры состоят из окрашенных сухих желатиновых слоев, помещенных между двумя стеклянными пластинками хорошего оптического качества. Оба вида фильтров превосходно оправдали себя. Фильтры с окрашенным желатиновым слоем имеются в продаже и применяются гораздо чаще жидких. Иногда пользуются фильтрами из окрашенного в массе стекла, которое должно быть изготовлено таким образом, чтобы в этих фильтрах не происходило никакого нежелательного иррегулярного преломления света. Ввиду высоких требований, пред'являемых к качеству сухих фильтров, изготовление их обходится довольно дорого. Как мы уже заметили, для наших целей очень удобны желатиновые фильтры, причем должно быть обращено внимание на то, чтобы тепло от источника света не плавило желатинового слоя. Миз предложил целую серию светофильтров специально для микрофотографии. Эти фильтры известны в продаже под названием М-фильтров Рэттена. Светофильтры для микрофотографических целей выпущены также в виде серии из 11 фильтров фабрикой светофильтров «Лифа» в Аугсбурге. Пригодность этих фильтров подтверждена многими опытами; ими давно пользуются многие микрофотографы.

В нижеприведенных таблицах сопоставлены М-фильтры Рэттена: для каждого из них указана область пропускания и фактор экспозиции (крайность).

Комбинируя различные М-фильтры группами по два, можно изолировать из спектра 10 узко ограниченных смежных областей, идущих от крайнего фиолетового (4 000 Å) глубоко в красный (7 000 Å).

Пользование отдельными фильтрами или группами фильтров связано с увеличением в соответствующее число раз времени экспозиции, которое при прочих равных условиях потребовалось

| Название фильтра | Цвет (визуально) | Прозрачен для спектральной области от . . до . . Å | Фактор экспозиции для открытой дуги и панхроматической пластинки |
|---|---|---|---|
| A | Оранжево-красный | 5 800—красный конец | 6 |
| B | Зеленый | 4 600—6 000 | 12 |
| C | Сине-фиолетовый | 4 000—5 100 | 12 |
| D | Пурпуровый | 3 800—4 600<br>6 400—красный конец | —<br>— |
| E | Оранжевый | 5 600 „ „ | 6 |
| F | Чистокрасный | 6 100 „ „ | 8 |
| G | Желтый (очень чистый) | 5 100 „ „ | 4 |
| H | Синий | 4 200—5 400 | 12 |
| $K_2$ | Бледножелтый | Для ортохроматической репродукции | 1½ |

| Название фильтра | Основная длина волны | Цвет (визуально) | Фактор экспозиции для открытой дуги и панхроматической пластинки |
|---|---|---|---|
| D и H | 4 500 | Фиолетовый | 64 |
| C и H | 4 800 | Синий | — |
| B и C | 5 050 | Сине-зеленый | 600 |
| B и H | 5 200 | Зелено-голубой | — |
| G и H | 5 350 | Чистозеленый | 1 600 |
| B и G | 5 500 | Желто-зеленый | 64 |
| B и E | 5 750 | Зелено-желтый | 250 |
| A | 6 000 | Оранжево-красный | — |
| F | 6 250 | Чистокрасный | — |
| A и D | 6 610 | Темнокрасный | 240 |

бы при пользовании той же пластинкой и тем же источником света, но без фильтра. Указанные в 4-м ряду таблиц коэфициенты удлинения экспозиции относятся — надо это твердо помнить — к открытой дуге и указанному сорту пластинок. Для других источников света и других сортов пластинок получатся другие факторы экспозиции (см. S. H. Pledge, Phot. Journ, 1921; в этой статье превосходно изложено применение светофильтров в микрофотографии).

### Монохроматические фильтры

Выше мы уже упоминали о пользе так называемого монохроматического зеленого фильтра, пропускающего довольно узко ограниченный участок в желто-зеленой области спектра. Такой фильтр можно очень рекомендовать как для визуального наблюдения в микроскоп, так и для микрофотографических целей; с

этим фильтром обыкновенный ахроматический об'ектив дает почти те же результаты, что и дорого стоящий апохромат. Такой зеленый фильтр должен поглощать волны длиной от 4 000 до 5 000 Å и от 6 400 до 7 000 Å и пропускать спектральную полосу от 5 400 до 6 000 Å. Обычно апохроматические об'ективы бывают хроматически исправлены главным образом в этой спектральной области.

### Контрастные фильтры

Для выявления или усиления контраста в изображении применяются фильтры, цвет которых является дополнительным к определенному цвету об'екта. (Многие микроскопические препараты окрашиваются определенными красителями, воспринимаемыми известными частями об'екта и удерживаемыми ими, в то время как другие участки об'екта остаются неокрашенными; таким образом об'ект выглядит пятнистым — окрашенным.)

При фотографировании препарата с синими включениями берут в зависимости от характера синей окраски красный или желто-зеленый фильтр, для препарата с красными включениями — зеленый фильтр, для препарата с желтыми включениями — синий фильтр и наконец для препарата с фиолетовыми включениями берут определенный желтый фильтр.

Если требуется смягчить имеющиеся цветные контрасты и сделать более заметными детали, то для с'емки надо применить свет той же самой спектральной области, для которой данный об'ект, взятый в целом (т. е. вместе с окрашенными участками), прозрачен. Другими словами, в этом случае следует пользоваться светом дополнительным к «среднему» цвету спектра поглощения всего об'екта, взятого в целом. На практике это правило не всегда в точности справедливо, особенно когда приходится иметь дело со слабо окрашенными препаратами; обычно же рекомендуется выбирать фильтр, пропускающий узкую спектральную полосу по соседству с максимумом поглощения всего об'екта, иначе слишком сильный контраст разрушит тонкие детали.

Миз указывает по этому поводу следующее: «Если какой-нибудь цвет должен быть передан фотопластинкой или воспринят глазом как черный, то его следует фотографировать или визуально рассматривать при свете, нацело поглощающемся этим цветом».

Известен ряд об'ектов, для которых это правило не вполне выполняется. При фотографировании различных об'ектов мы, вообще говоря, добиваемся не получения контрастов в изображении, а выявления деталей. Желая в достаточной мере считаться с последним требованием, следует пользоваться фильтром того же цвета, что и снимаемый об'ект, т. е. применить например оранжевый фильтр, когда требуется фотографически безукоризненно передать крыло насекомого, имеющего желто-красный цвет.

Рекомендуется суб'ективно испробовать действие фильтра до его фотографического применения. На основании подобного испытания выбирается такой фильтр или такая комбинация фильтров,

которая по суб'ективному впечатлению должна была бы наиболее правильно дать желаемый результат.

Пользуясь обыкновенным ахроматом, следует наводку об'екта производить со вставленным фильтром. При пользовании апохроматом и при условии, что фильтр достаточно тонок, можно производить наводку без фильтра, так как изображение, проектируемое апохроматом, оказывается в той же самой плоскости и при белом и при отфильтрованном свете.

Дж. Е. Бернард особенно рекомендует для различных целей зеленый жидкий фильтр Цетнова. Он состоит из насыщенного водного раствора азотнокислой меди, смешанного с водным раствором хромовой кислоты. Этот фильтр поглощает синий и красный концы спектра; путем соответствующего изменения соотношения и концентрации обеих жидкостей можно получить фильтр, который сильнее поглощает либо один, либо другой конец спектра, либо оба вместе.

### Монохроматическое освещение

Довольно трудно непосредственно создать монохроматический свет, т. е. свет, содержащий только лучи одной какой-нибудь длины волны. Такой свет получается при пользовании например ртутной лампой в комбинации с соответствующе подобранными специальными фильтрами. При помощи таких фильтров исключаются ненужные спектральные области и профильтровываются только нужные участки спектра.

Нижеследующие растворы в комбинации с ртутной лампой пригодны в качестве жидких фильтров:

1. Область пропускания 5 790—5760 Å (желтая спектральная область).

| | |
|---|---|
| Двухромокислый калий | — 15 *г* |
| Сернокислая медь (медный купорос) | — 3,5 *г* |
| Серная кислота | — 1 $см^3$ |
| Дестиллированная вода | — 300 $см^3$ |

2. Область пропускания около 5 460 Å (зеленый свет).

| | |
|---|---|
| Пикриновая кислота | — 0,4 *г* |
| Сернокислая медь (медный купорос) | — 3,5 *г* |
| Азотнокислый дидимий | — 15 *г* |
| Дестиллированная вода | — 300 $см^3$ |

3. Область пропускания около 4 360 Å (синий свет) и от 4 070 до 4 050 Å (фиолетовый свет).

| | |
|---|---|
| Сернокислая медь | — 1 *г* |
| Дестиллированная вода | — 225 $см^3$ |
| Аммиак (уд. вес 0,880) | — 75 $см^3$ |

При работе не с ртутной лампой, а с другими источниками света в качестве жидких фильтров пригодны два отдельные раствора тартрацина и зацерегрюна, которые, взятые вместе, пропускают спектральную область около 5 300 Å (зеленый свет; монохроматический зеленый фильтр).

Установлено, что раствор пикриновой кислоты очень хорош в качестве жидкого фильтра при условии, что для микрофотографической с'емки применяется ахроматический об'ектив. Названный раствор полностью поглощает весь фиолетовый конец спектра (3 500—4 700 Å) и имеет таким образом ясно выраженную полосу поглощения в этой области. Раствор пропускает желтый и зеленый цвета и обусловливает очень небольшое ослабление света. В заключение надо сказать, что применение жидких фильтров определенного спектрального пропускания или поглощения тоже конечно приводит к удлинению необходимого для снимка времени экспозиции. (Фактор удлинения экспозиции в этом случае меньше, чем при пользовании аналогичными сухими фильтрами.)

### Освещение прозрачных об'ектов при затемненном поле

При этом способе освещения исследуемый об'ект виден светлым на темном фоне. Первоначально такое освещение достигалось тем, что применялся параболоидный конденсор Венчамша или обыкновенный конденсор микроскопа, середина которого каким-либо образом закрывалась. И в настоящее время используют аналогичный принцип. Берут нормальный конденсор микроскопа с большой апертурой. Вступающий в конденсор свет частично задерживается соответствующе помещенным, центрально расположенным диском, непрозрачным посередине («центральной диафрагмой») и не попадает на об'ект, таким образом из конденсора выходят только краевые лучи и освещают об'ект. Центральная диафрагма конденсора должна быть строго центрирована и очень точно установлена, т. е. она должна соответствовать апертуре примененного об'ектива. Ирисовая диафрагма Дэви, помещенная под сменной рамкой об'ектива, позволяет согласовать апертуру используемого об'ектива с величиной диафрагмы для освещения при затемненном поле. Если из конденсора исходит больше краевых лучей, чем это требуется для исследуемого об'екта, то изображение кажется завуалированным; с этим неприятным обстоятельством борются тем, что отверстию ирисовой диафрагмы конденсора придают надлежащую величину. Описанные нами приспособления оправдывают себя только при малых увеличениях. Для освещения при затемненном поле требуется всегда очень интенсивный источник света, и несмотря на это, при фотографировании необходима очень продолжительная экспозиция.

## Методы работы вмикрофотографии

Горизонтально расположенная микрофотографическая аппаратура большей частью состоит из следующих частей:

а) источник света, заключенный в светонепроницаемой коробке для того, чтобы излучаемый им свет не слишком сильно освещал рабочее помещение;

б) собирательная система линз (плосковыпуклая линза, обращенная плоской стороной к источнику света, или конденсор Нельсона, дающий меньше аберраций, чем простая плосковыпуклая линза) с ирисовой диафрагмой;

в) кювета с водой, служащая для охлаждения, или кювета с жидким фильтром;
г) вторая собирательная система линз, тоже снабженная диафрагмой (первая из названных собирательных систем до известной степени играет роль коллиматора, а последняя—коллектора; самый же коллектор отсутствует);
д) к общей системе относится также осветительный аппарат для микроскопа Аббе с ирисовой диафрагмой, центрируемый точнейшим образом с помощью собственного приспособления для центрирования;
е) приспособление для наводки микроскопа на расстоянии (рис. 143);
ж) светонепроницаемое соединение между передней частью камеры и микроскопом.

Следующее требование является основным: перед началом работы источник света, собирательные системы (коллиматор и коллектор), конденсор микроскопа, об'ектив, окуляр и камера должны быть точно центрированы. Для безукоризненно точного центрирования всей системы очень удобно пользоваться трехгранной металлической линейкой, по которой можно перемещать рейтеры с подставками; на последних устанавливается источник света и различные применяемые собирательные системы.

На время экспозиции, необходимое для получения хороших микрофотограмм, влияют следующие факторы:

1. Чувствительность примененного сорта пластинок.
2. Интенсивность источника света.
3. Степень исправленности взятой оптической собирательной системы.
4. Применение светофильтра.
5. Численная апертура (А) об'ектива (продолжительность освещения пропорциональна $\frac{1}{(A)^2}$).
6. Увеличение снимаемого об'екта, видимого на матовом стекле (увеличение зависит от взятого об'ектива и окуляра.) Время экспозиции меняется с квадратом увеличения: например, если при 25-кратном увеличении необходимая продолжительность освещения равна 4 сек., то при 50-кратном увеличении нужно экспонировать 16 сек., при 100-кратном — 64 сек. и т. д.
7. Растяжение камеры.
8. Увеличение, даваемое самым окуляром.
9. Свойства об'ектива, т. е. его цвет, прозрачность (плотность) и т. д.

Учтя перечисленные выше факторы, можно рассчитать время нормальной экспозиции при микрофотографической с'емке. Разработаны разнообразные системы (таблицы освещения), которые в каждом отдельном случае должны облегчить микрофотографу отыскание нужного времени освещения (см. выше таблицы кратности светофильтров), но несмотря на это без достаточного опыта едва ли возможно найти правильное время освещения. Начинающему лучше всего поступать следующим образом: при с'емке определенного об'екта сделать ряд опытов, пользуясь одним и

тем же сортом пластинок, на которых он предполагает работать и в дальнейшем, и из полученных данных сделать надлежащие выводы о нормальной продолжительности освещения.

Эти опыты ставятся следующим образом: об'ект резко наводится на матовое стекло и по яркости видимого на нем изображения приблизительно выбирается нужное время экспозиции. Допустим, что мы остановились на 10 сек. Приготовляем кассету и открываем ее сначала на 5 сек., т. е. на время в 2 раза короче принятого. При этом снимке кассета была открыта полностью, так что экспозиции подверглась вся поверхность пластинки. Вслед за этим делают второй снимок на этой же пластинке, причем $^1/_4$ пластинки оставляют закрытой заслонкой кассеты и экспонируют в продолжение еще 5 сек. Затем повторяют эту операцию еще раз, закрывая уже половину пластинки и освещая в течение 10 сек. В четвертый раз экспонируем в продолжение 20 сек. и прикрываем заслонкой $^3/_4$ пластинки. После проявления пластинки мы получим изображение об'екта, состоящее из 4 полос с различным почернением. Рассматривая снимок, легко определить, какая полоска экспонирована лучше всех и потому лучше всего годится для копирования. Установив это, отмечаем все встречающиеся здесь данные и условия и полученное наиболее соответствующее время экспозиции. Очень рекомендуется вести тщательную запись сделанных микрофотограмм, в которую вносить полученные (правильно выбранные) продолжительности освещения. Такие записи помогут научиться уверенно делать безукоризненные микрофотограммы, и время, затраченное на ведение записей, окупится вполне.

## Сорта пластинок

Пластинки, применяемые в микрофотографии, должны обладать мелким зерном. При этом нужно помнить, что мелкое зерно обусловливает меньшую чувствительность. Во избежание ореолов рекомендуется пользоваться пластинками с подслоем. В определенных об'ектах их цветные оттенки не могут быть ясно переданы ортохроматической пластинкой. В таких случаях нужна панхроматическая пластинка.

## Основные правила микрофотографии

1. Никогда не экспонировать чересчур коротко.

2. Пользоваться проявителем, о котором по собственному опыту уже известно, что с помощью его можно добиться требуемых результатов. Если нужно получить очень контрастные снимки, рекомендуется брать метохиноновый проявитель со слабой добавкой бромида; при желании получить мягкие снимки в качестве проявителя следует брать несколько подогретый пирогалловый проявляющий раствор.

3. Избегать вертикального проявления; рассматривать проявляющееся изображение при свете надежной неактиничной лампы. Продолжительность проявления ставить в зависимость от требующегося в каждом случае результата. Удлиненное проявление повышает контрасты в изображении.

4. В случае передержки не прерывать проявления слишком рано.
5. Стремиться получить такой негатив, который не требовал бы никакой дополнительной обработки (усиления, ослабления), и тщательно сушить его.
6. По возможности работать на одном и том же сорте пластинок (не соблюдая это правило только в исключительных случаях) и тщательно изучать все особенности этого сорта.

## Стереомикрофотография

В некоторых случаях желательно приготовление стереоснимка передаваемого об'екта. Это случается, когда об'ект (в особенности прозрачный) имеет такую протяженность в глубину, что с помощью об'ектива микроскопа никак нельзя сделать снимка с достаточной глубиной фокуса. Для получения стереомикрофотограммы пользуются или специальным микроскопом с двумя тубами и двумя об'ективами или же простым монокулярным микроскопом; последний в некоторых случаях тоже может быть очень полезен для данной цели. Для получения обеих половинок изображения стереограммы посредством простого микроскопа поступают одним из описанных ниже способов.

Если положение об'екта на предметном столике остается неизменным, то для первой стереос'емки пользуются одной половинкой об'ектива, а для второй — другой. Этот способ с'емки возможен с помощью особой установки (Джексона): между об'ективом микроскопа и концом тубуса микроскопа, обращенным к об'екту, укрепляется простое добавочное устройство; с помощью имеющейся в нем круглой или квадратной диафрагмы сначала одна, а затем другая половина об'ектива открываются для свободного доступа лучей. Освещение дается одно за другим на пластинках размером около $9 \times 12$ *см*. На одной пластинке появляется изображение, «видимое» левой половиной об'ектива, а на другой — правой. На пластинках следует отметить «главную точку» об'екта, а также обозначить, какая пластинка, какой половиной об'ектива была освещена. Знание этого обстоятельства очень важно для дальнейшего монтирования позитива.

В половинных снимках надо избегать жесткости и больших контрастов, поэтому лучше всего стараться получать переосвещенные негативы, дающие, как учит опыт, наилучшие стереограммы.

Другой способ получения стереомикрофотограммы заключается в сдвигании об'екта. При третьем способе сдвигается об'ектив отдельно или вместе с камерой, а об'ект лежит неподвижно на своем месте. Понятно, что оба снимка делаются не одновременно, а последовательно друг за другом.

В только что упомянутых способах два стереоснимка делаются или на двух половинках пластинки $13 \times 18$ *см*, причем каждый раз неосвещаемая половинка пластинки прикрывается куском картона или посредством специального шторного затвора, или же пользуются двумя отдельными пластинками $9 \times 12$ *см*.

Когда оба снимка правильно монтированы и поставлены на обычном (среднем) расстоянии 65 *мм* (друг от друга), получаются стереоизображения.

Для стереомикрофотографических с'емок особенно подходят такие непрозрачные об'екты, у которых имеется много углублений и возвышений и которые косо освещены (снимки в отраженном свете), так как тени, возникающие при косом освещении, значительно увеличивают впечатление пластичности. Для стереоснимков более всего подходят об'екты, обычно рассматриваемые слабыми об'ективами (об'ективами с фокусным расстоянием 25—50 *мм*), однако автору удалось приготовить удачные стереоскопические снимки диатомей, которые при соответствующем освещении действовали, как непрозрачные об'екты; на этих снимках можно было увидеть многочисленные углубления и возвышения, которые нельзя было бы увидеть в проходящем свете. Эти снимки были сделаны в отраженном свете при косом освещении, с короткофокусным об'ективом.

## Литература

Aud. Köhler, Mikrophotographie, Handbuch der biologischen Arbeitsmethone, herausgeg, von E. Abderhalden, Abt. II, Teil 2, Heft 6, Berlin und Wien, Urban & Schwarzenberg, 1927.

K. Laubenheimer, Lehrbuch der Mikrophotographie, Berlin und Wien, Urban & Schwarzenberg, 1920.

A. Zimmerman—P. Metzner, Das Mikroskop, 2. Aufl, Leipzig und Wien, Franz. Deuticke, 1928.

J. E. Barnard und Frank V. Welch, Practical Photo-Micrography, 2. ed. London, E. Arnold & Co., 1925.

8 ГЛАВА

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОГРАФИИ В ГЕОДЕЗИИ

---

С. Л. УИНТЕРБОДЕМ

## Измерение с помощью фотографии

Фотограмма (фотографический снимок) передает изображения предметов в определенном соотношении их друг к другу. Если определенные величины известны, то из относительного положения изображений отдельных предметов можно вывести угловые величины. Из точки, в которой находилась фотографическая камера в момент с'емки, можно на основании фотограммы провести лучи по направлению к отдельным точкам об'екта, положение которых, предположим, нам надо определить на географической карте. Для этого должно быть известно эквивалентное фокусное расстояние об'ектива камеры (расстояние до изображения), а также угол визирования[1] с места нахождения об'ектива по направлению на одну какую-нибудь видимую на фотограмме точку. Таким образом фотокамера при определении углов играет роль теодолита или мензулы. Ясно конечно, что вертикальные углы определяются по фотограмме точно так же, как и горизонтальные. Описанный геодезический метод называется фотограмметрией.

По причинам, которых мы подробнее коснемся ниже, измерения с помощью фотографии особенно ценны в гористых и сильно пересеченных местностях. Фактически геодезическая с'емка многих гористых частей Европы и северо-западной Канады по большей части сделаны с помощью фотографии. Капитальные труды по фотограмметрии на английском языке написаны Е. Девиллем, руководителем геодезической службы в Канаде.

Допустим, что мы сделали два снимка одного и того же об'екта (ландшафта, здания и т. д.) с двух разных точек и нанесли эти

[1] Под углом визирования какого-нибудь отрезка мы поинмаем положительный, при отсчете по направлению часовой стрелки, угол, заключенный между направлением осн абсцисс применяемой в геодезии координатной системы и этим отрезком.

точки на географическую карту или план. Поскольку измеряемый об'ект на обоих снимках виден целиком, из обеих точек зрения можно провести лучи ко всем точкам изображения и точкам об'екта, идентичным на обоих снимках. Если сделать такое построение для всех возможных точек об'екта, то получится совершенный план об'екта, о котором идет речь. Этот метод измерения называется наземной фотограмметрией (фототопографией). Для того чтобы охватить возможно больший участок, рекомендуется ставить камеру в наиболее высоко расположенной точке. Ясно, что с самого начала развития фотограмметрии, исходя из последнего соображения, пробовали помещать фотографическую камеру на воздушных шарах или змейковых аэростатах и делать снимки с воздуха. Эти снимки вначале были мало удовлетворительны, и было очень трудно делать их с необходимой степенью точности; несмотря на это, такие фотограммы использовались с военной целью сравнительно уже давно как в Европе, так и в Америке.

Изобретение аэроплана и чрезвычайная важность аэрос'емки для военных операций послужили причиной того, что названной отрасли фотограмметрии было уделено много внимания. Топографию, основанную на аэроснимках, называют аэрофотограмметрией (аэрофотографией).

Независимо от того, сделаны ли снимки на земле или с самолета, всегда исходя из измерений, производимых на отдельных фотографических пластинках и из места расположения камеры (местонахождение об'ектива), мы вычисляем углы, а не расстояние (удаленность) изображенных наземных точек от местонахождения камеры (об'ектива). Расстояния (удаленность) отдельных точек на поверхности земли от точек с'емки определяются путем пересечения лучей, проведенных от одной точки с'емки, с соответственными лучами, идущими от другой точки с'емки. (Полученную точку пересечения можно определить еще и по лучам, проведенным от третьей, четвертой и т. д. точек с'емки.)

Безукоризненное отождествление соответственных точек в отдельных снимках является основным по важности при этом методе вычерчивания карты. Недостатки фотограмметрического способа составления карт зависят главным образом от ошибок при отождествлении точек изображения, а также от неустранимых ошибок при промере пластинок и копий.

Связанное с большими затруднениями отождествление точек изображения можно обойти, используя в этих целях способность человеческого зрительного аппарата видеть стереоскопически. К. Пульфрих (Иена) предложил специальный прибор, стереокомпаратор, с помощью которого две фотограммы, снятые с концов некоторого базиса, можно рассматривать стереоскопически; располагая определенными данными промера, можно вычислить положение и высоту (относительно концов базиса) всех точек об'екта, видимых на обеих фотограммах.

Е. Орель сконструировал в 1905 г. стереоавтограф, с помощью которого можно «механически» (автоматически) вычерчивать горизонтали; этот прибор соединен со стереокомпа-

р а т о р о м, являющимся важной составной частью стереоавтографа. Зарисовка горизонталей происходит таким образом: стереокомпаратор последовательно наводится с одной наземной точки на другую или, вернее, на их изображения; движения стереокомпаратора передаются на пишущее острие системой линеек пантографического типа. Если работа производится по стереоскопическому методу, то в зависимости от того, производится ли измерение этим путем или же детали земной поверхности определяются по плану, говорят о с т е р е о ф о т о г р а м м е т р и и или же о с т е р е о т о п о г р а ф и и.

Недавно Р. Гугерсгоф сконструировал а в т о к а р т о г р а ф, а Е. Бауэрфельд (у Цейсса) — с т е р е о п л а н и г р а ф — приборы, позволяющие производить автоматическое вычерчивание географических карт, исходя из аэроснимков.

При проведении фотограмметрического измерения играют роль определенные практические навыки. Фотограммы подчинены основным законам перспективы, которыми определяется относительное расстояние в снимке между отдельными точками и линиями. Инструменты, которыми пользуются в фотограмметрии, должны обладать определенными конструктивными особенностями для того, чтобы давать требуемые снимки. В следующем отделе этой главы мы рассмотрим подготовительные работы, которые должны предшествовать фотограмметрической с'емке, а в последующих частях нашего изложения будут разобраны наземная фотограмметрия, аэрофотограмметрия и наконец стереофотограмметрия.

## Подготовительные работы при каждой геодезической с'емке

Для того чтобы иметь возможность охватить большую площадь на поверхности земли и затем вычертить ее карту, необходимо иметь сеть измеренных точек, взаимное расположение которых установлено с достаточной точностью. Такая сеть получается, если сначала измерить б а з и с (обычно значительной длины). Исходя из этого базиса, всю измеренную местность покрывают сетью треугольников; этот рабочий процесс называется т р и а н г у л я ц и е й. (Для того чтобы вся сеть треугольников была лучше «прикреплена», она примыкает к нескольким базисным линиям.) Первичная триангуляция (первого порядка) состоит из сеток, стороны треугольников которых могут иметь в длину до 50 *км*. Можно принять, что найденные длины сторон этих треугольников страдают ошибкой в $^1/_{50000}$. К триангуляции первого порядка примыкают триангуляции низших порядков, которые можно проделать с помощью инструментов меньшей прецизионности; в конце концов вся местность оказывается покрытой сетью треугольников, стороны которых имеют в длину по нескольку километров. Все геодезические работы по с'емке, как-то: тахиметрирование, мензульная с'емка, полигонизация, детальная с'емка, профилирование и т. д., основываются на предварительно проделанной основной триангуляции; названные методы дают результаты, страдающие ошибкой в среднем в $^1/_{1000}$. В фотограмметрии и фототопографии достигается почти такая же точность.

В дальнейшем изложении мы будем исходить из наличия тригонометрической сети.

Приступим теперь к определению терминов и понятий, которыми мы будем пользоваться при дальнейшем изложении.

## Фотограмметрическая терминология

*Главная точка изображения* есть основание нормали, опущенной из об'ектива (или, вернее, из его второй узловой точки) на плосоединяющие главные марки фотограммы[1].

*Середина (средняя точка изображения)* есть точка пересечения обеих главных линий фотограммы; главные линии — линии, соединяющие главные марки фотограммы[2].

*Главная вертикальная плоскость* есть плоскость, проходящая через об'ектив (его вторую узловую точку), зенит и главную точку изображения.

*Главная вертикаль* есть линия пересечения плоскости фотограммы с главной вертикальной плоскостью.

*Линия горизонта* — линия пересечения горизонтальной плоскости, проходящей через вторую узловую точку об'ектива, с плоскостью пластинки.

*Точка основания (надирная точка)* об'ектива в плоскости местности или карты есть точка, лежащая в момент с'емки отвесно под об'ективом в плоскости местности или карты[3].

*Точка основания (надирная точка) об'ектива в плоскости фотограммы* есть перспективное изображение в фотограмме точки основания об'ектива в плоскости местности или карты. Эта точка одновременно является точкой схождения всех прямых об'екта.

*Под вертикальной с'емкой* разумеется с'емка, при которой оптическая ось об'ектива направлена вертикально.

*Под горизонтальной с'емкой* разумеется с'емка, при которой оптическая ось об'ектива направлена горизонтально.

*Под выпрямлением* понимается процесс перепроектирования с соблюдением определенных условий наклонного снимка в вертикальную или горизонтальную плоскость.

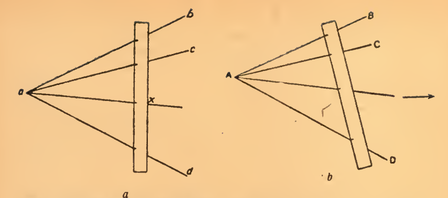
## Основные законы перспективы

Фотографическое изображение по условиям его образования является перспективным изображением передаваемого им об'екта. Простейший случай — это когда перспективное изображение плоского об'екта, расположенного перпендикулярно к оптической оси об'ектива, проектируется на плоскость, параллельную плоскости об'ектива. При таких условиях получается копия (воспроизведе-

[1] Когда фотометрическая камера безукоризненно точно юстирована, эта нормаль совпадает с оптической осью об'ектива.

[2] Середина пластинки должна совпадать с главной точкой изображения, когда об'ектив находится в нормальном (среднем) положении.

[3] Так как карту можно рассматривать, как масштабное уменьшение представленной на ней местности, то всякую зависимость между местностью и ее изображением можно перенести на карту изображения.




144. Ангармоническое отношение четырех точек к прямой. Левый чертеж соответствует фотограмме, правый — карте (плану)

ние) оригинала, отличающаяся от последнего только масштабом. Примем, что масштаб изображения будет $m$, тогда в изложенном выше простом случае $m = \frac{f}{a-f}$,

где $f$ означает фокусное расстояние об'ектива и $a$ — расстояние об'екта от об'ектива. Такой снимок получается, если например отвесную скалу сфотографировать на параллельно к ней стоящей пластинке или плоскую местность снять с самолета на горизонтально расположенной фотографической пластинке.

Наличие последнего условия крайне желательно при аэрофотограмметрической с'емке горизонтальной плоской местности, однако оно редко возможно без ошибок.

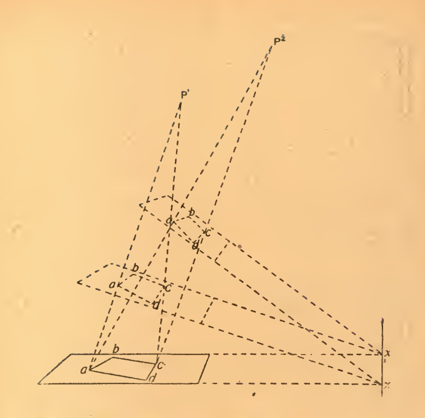
В тех случаях, когда не имеют места упомянутые выше упрощенные допущения, параллельные линии, лежащие в плоскости об'ектива, изобразятся прямыми, имеющими в изображении точку схождения (исчезновения). Точка схождения вертикальных (отвесных) прямых оригинала есть надирная, или зенитная, точка снимка; горизонтально идущие параллельные прямые имеют точку схождения на линии горизонта. Позже мы покажем, что точки схождения в снимке могут иметь очень важное значение в фотограмметрических построениях.

Теперь постараемся кратко изложить основные законы перспективы, имеющие фундаментальное значение в фотограмметрии.

1. Прямая линия на плоскости в перспективном изображении этой плоскости передается в виде прямой линии.

2. Ангармоническое отношение (т. е. не связанное никаким условием) четырех точек какой-нибудь прямой не изменится в перспективном изображении этой прямой (рис. 144, *a* и *b*).

Закон, изложенный в п. 2, очень важен, так как оказывает ценную помощью при графическом промере фотограмметрических снимков. Допустим, что четыре точки *B, C, X, D* лежат в одной плоскости и нанесены на географическую карту (план) (рис. 144, *b*); затем допустим, что изображение *b, c, x, d* этих точек можно отыскать на фотографическом снимке этой плоскости (рис. 144, *a*).

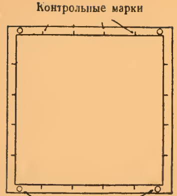



**145.** К основным законам (3 и 4) перспективы; $P^1$ и $P^2$ — два центра перспективы, $XX$ — ось перспективы

Тогда мы можем дальше сделать следующее: в фотограмме из точки *a* мы проводим пучок прямых, на которых расположены точки *b, c, d* и все прочие точки изображения, которые мы хотим занести в план. Поперек такого пучка прямых в произвольном месте накладываем полоску бумаги и отмечаем на ней точки, в которых прямые *ab*, *ac*, *ad* и т. д. пересекают край полоски. Затем накладываем полоску с отметками на пучок прямых *AB*, *AC*, *AD* и т. д. на карте или на плане таким образом, чтобы отмеченные на полоске точки оказались на соответственных прямых. Само собой понятно, что мы должны иметь возможность отождествить точки *A* и *a*. Если полоски приложены правильно, то и прочие ее отметки должны перейти на карту, и прямые, выходящие из *A* и направленные на точки, подлежащие нанесению на план (карту), должны проходить через эти точки.

Описанные действия можно повторить с точками *B, C* или *D*, взятыми в качестве вершин пучка прямых. В точке пересечения соответственных прямых мы обнаружим точки, положение которых нам требуется определить.

3. Представим себе некоторую фигуру на плоскости. Тождественные перспективные изображения этой фигуры можно получить



**146** Измерительная рамка фотограмметрической камеры

во всех плоскостях, имеющих общую прямую пересечения с плоскостью, содержащей изображаемую фигуру; эта прямая пересечения плоскостей называется осью перспективы.

4. Центры перспективы, из которых можно построить упомянутые в п. 3 тождественные перспективные изображения взятой нами плоской фигуры, лежат в плоскости нормальной оси перспективы (рис. 145).

Законы третий и четвертый приложимы в тех случаях, когда нужно вычертить карту плоскостей местности, основываясь на невертикальных аэроснимках. Если оптическая ось камеры была наклонена к вертикали под определенным углом, то, основываясь на изложенных выше законах, можно перепроектировать полученные изображения с помощью соответствующих фотографических проекционных приборов; при этом можно изменить величину и очертания окончательного изображения.

Ограниченный об'ем книги лишает возможности детализировать основные законы перспективы.

Отсылаем читателя к соответствующей специальной литературе, приведенной в конце этой главы, в особенности же обращаем его внимание на фундаментальный труд Е. Девилля «Photographic Surveging».

## Фотограмметрическая камера

Для измерения углов на основании фотограммы нужно знать расстояние до об'екта в момент с'емки. Когда на пластинке изображено достаточное количество точек, положение которых известно, расстояние до об'екта можно определить путем построения чертежа; кроме того названную величину необходимо определить и путем расчета.

Поверхность светочувствительного слоя применяемой пластинки или пленки должна находиться в точности в плоскости изображения, т. е. на расстоянии от второй узловой (главной) точки об'ектива, равном для очень удаленных об'ектов эквивалентному фокусному расстоянию об'ектива камеры (измеренному вдоль его оптической оси).

Во всех камерах, специально предназначенных для фотограмметрических целей, светочувствительный слой в момент с'емки прижат к металлической рамке, расстояние которой от об'ектива камеры должно быть в точности известно. Так как для фотограмметрических построений важна середина изображения, по краю металлической рамки нанесены 4 марки; линии, соединяющие каждую пару диагонально лежащих друг против друга марок или

их изображений (рис. 146), пересекаются в средней (главной) точке изображения[1].

Оказалось целесообразным наносить на измерительную металлическую рамку и другие марки на определенных расстояниях друг от друга, так как по расстояниям изображений этих марок в фотограмме можно установить наличие дисторсии об'ектива в том случае, когда она имеется. Кроме того по изображениям этих марок можно судить, возникли ли в копии или на увеличении с полученного негатива какие-либо искажения. Стенки камеры должны быть изнутри черными, матовыми для того, чтобы предотвратить нежелательные отражения внутри камеры.

Для фотограмметрических с'емок пользуются противоореольными пластинками (снабженными окрашенным слоем с задней стороны или промежуточным подслоем), так как ореолы сильно искажают изображение. Громадное значение имеет правильный выбор об'ектива; в особенности надо позаботиться о том, чтобы об'ектив был свободен от дисторсии; небольшую имеющуюся дисторсию можно компенсировать путем вычисления, но лучше предотвратить затрату времени на эту работу.

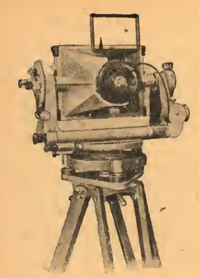
Рекомендуется выбирать об'ектив с большим полем зрения, причем резкость изображения до самого края пластинки должна быть равномерной. Сферическая и хроматическая аберрации об'ектива должны быть ничтожно малы.

Перечисленными свойствами должна обладать камера как для наземной с'емки, так и для воздушной. Так как каждый из названных типов камер должен обладать кроме того целым рядом специальных свойств, оба типа камер сконструированы по-разному. Прежде всего наземная фотограмметрия допускает долгие экспозиции, в то время как в аэрофотограмметрии необходимы очень короткие моментальные с'емки, так как самолет движется со скоростью, равной в среднем 50 *м* в секунду. При фотограмметрической наземной с'емке камеру нужно устанавливать на прочном треногом штативе, достаточно крепком и в то же время портативном[2].

При всех видах фотограмметрических измерений очень важно, чтобы пластинке в момент с'емки можно было придать вполне точно определенное положение. При горизонтальной с'емке камера должна быть установлена так, чтобы плоскость пластинки была точно вертикальной. При вертикальной с'емке с самолета плоскость пластинки должна быть расположена горизонтально. До сих пор мы не располагаем средством для надежного и безошибочного определения положения пластинки во время полета. Если мы сумеем добиться возможности привести камеру для воздушной с'емки во время полета в такое положение, чтобы плоскость пластинки была строго горизонтальной, то будет устранено много трудностей, существующих до сих пор в аэрофотограмметрии, и для промера снимков, сделанных с самолета, мож-

[1] Главные марки могут быть нанесены также посредине края рамки; такое расположение марок встречается чаще.

[2] Е. Девиль рекомендует между ножками штатива вешать мешок с камнями; это придает штативу большую устойчивость.



147. Универсальный фототеодолит Р. Гугерсгофа. Прибор приспособлен к с'емке при наклонной оси камеры (построен фирмой „Aerotopograph" (Дрезден)

но будет воспользоваться сравнительно простыми стереоскопическими способами измерения. Фотографическая с'емка с воздуха очень трудна вследствие сравнительно больших скоростей передвижения и сотрясений самолета. Более подробные данные об этом см. в главе об аэрофотограмметрии.

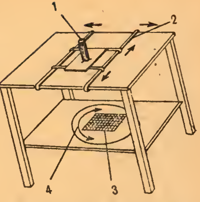
Добавим еще несколько замечаний о фотограмметрических аппаратах для наземной с'емки. Первоначально для этой цели пользовались обыкновенными фотографическими камерами без каких-либо особых механических или оптических приспособлений и довольствовались вначале тем, что в поле зрения с'емочного об'ектива вешали при с'емке тяжелый свинцовый отвес и фотографировали его. Прямая, параллельная изображению этого отвеса, определяла *главную вертикаль*, а перпендикуляр к ней—*линию горизонта* снимка. Снимки, получавшиеся с помощью таких простых камер, в общем не были «горизонтальными», и вычерчивание планов по таким фотограммам требовало множества расчетов.

В настоящее время геодезист имеет возможность выбрать среди многочисленных имеющихся в его распоряжении моделей фотограмметрических камер наиболее для него подходящую. Большинство этих камер приспособлено только для горизонтальной с'емки, а некоторые модели камер дают возможность делать и наклонные снимки. Камеру соединяют с теодолитом; последний помещается на камере сверху или сбоку или устанавливается вместо на нее штативе. В модели камеры Шелля посредине матового стекла помещается окуляр (со скрещенными нитями), образующий вместе с об'ективом камеры зрительную трубу. Скрещением нитей такой зрительной трубы определяется положение середины изображения или главной точки изображения. Пользуясь ватерпасом, можно устанавливать эти камеры горизонтально. Кроме того они большей частью устроены таким образом, что главная точка изображения и линия горизонта могут у них по требованию передвигаться. Во всех камерах, употребляющихся для фотограмметрических целей, следует заботиться о том, чтобы светочувствительный слой фотографической пластинки во время с'емки был прижат к измерительной рамке (описание которой было приведено выше); эта металлическая рамка — важная составная часть каждой фотограмметрической камеры (главные марки служат для определения средних точек изображения).

Е. Девилль описал в выше цитированной нами книге различные прежние модели фотограмметрических камер. Сам он сконструи-

ровал свою камеру таким образом, что она может быть помещена на теодолитном штативе; теодолит простого устройства служит для предшествующего всякой с‘емке измерения нужных углов.

Едва ли можно рекомендовать об‘единять камеру и теодолит в одном инструменте, так как каждый из этих приборов обладает особыми специфическими свойствами. За отделение камеры от теодолита говорит еще и то обстоятельство, что транспортабельность инструментария увеличивается когда он состоит из нескольких отдельных частей. Комбинации из фотографической камеры и теодолита имеют общее название ф о т о т е о д о л и т о в (рис. 147).




**148.** Схематическое изображение компаратора для промера фотографических пластинок

## Фотограмметрия

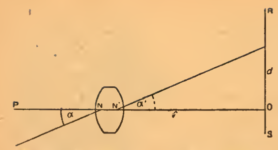
Прежде чем приступить к более детальному описанию основ фотограмметрии, постараемся выяснить, с какой степенью точности могут быть определены (на пластинке) искомые углы на основании наших координатных измерений.

*Определение углов, или, вернее, промер* на фотографической пластинке координат, которыми определяются углы, называется ф о т о г р а м м е т р и е й в собственном смысле этого слова. В топографических работах пользуются фотограмметрией реже, довольствуясь большей частью графическими методами. Но и здесь во многих случаях очень желательно определять угол визирования некоторых точек плана с точностью, недостижимой с помощью графических методов. Такое точное определение углов бывает необходимо, когда, исходя из нескольких известных топографических точек, хотят, обратно, найти положение точки, с которой произведена с‘емка, когда нужно установить положение новых контрольных точек или же определить или проверить определенные внутренние элементы ориентировки камеры.

Точность, с которой на основании измерения в фотограмме соответствующих координат изображения может быть определено положение точки в пространстве, зависит: а) от точности («резкости»), с которой могут быть измерены координаты изображения; б) от точности, с которой определено расстояние до изображения фотограмметрической камере; в) от точности, с которой найдены главные и средняя точки изображения на пластинке.

Координаты изображения легко промеряются при помощи простого компаратора, схематически изображенного на рис. 148.

Микроскоп *1* имеет две взаимно перпендикулярные шкалы (градуированная пластинка) в поле зрения (изображения). Место скрещения шкал совмещают с изображением промеряемой точки и прочитывают показания шкал в тех местах последних, где они




**149** К определению дисторсии фотографического об'ектива

пересекаются с имеющимися заранее линиями некоторого растра, нанесенного или непосредственно на слой негатива или на целлюлоидную пленку, находящуюся в тесном контакте с негативом. Конечно измерительные шкалы микроскопа должны быть параллельны или же перпендикулярны упомянутым линиям растра. Для того чтобы привести растр или шкалы в такое положение, держатель пластинки *4*, на котором лежит пластинка *3*, поворачивается около своего центра. Середину всего растра помещают по возможности ближе к главной или средней точке изображения, и упомянутые растровые линии ставят параллельно главной вертикальной линии или же линии горизонта фотограммы. Микроскоп может передвигаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях: в одном направлении на салазках *2*, в другом — вместе с салазками по столику самого инструмента.

Допустим, нам надо промерить положение какой-нибудь резко очерченной точки изображения (т. е. точки изображения, видимой так же резко, как изображение звезды); с помощью измерительной установки описанного выше типа координаты этой точки без особых затруднений определяются с точностью до $\pm 0{,}03$ *мм*. Практически едва ли возможно промерять все точки изображения с указанной степенью точности. Если с помощью теодолита визировать какую-нибудь очень отдаленную точку об'екта, то возможна довольно точная засечка ее (примерно путем бисекции) ввиду содействия различных факторов (света и тени, фона и т. д.). Все эти факторы мало помогают при промере фотонегатива; поэтому при промере хуже очерченных (менее резких) точек изображения точность меньше указанной выше.

По Гауссу, фокусное расстояние[1] об'ектива $f = \frac{d}{\operatorname{tg} \alpha}$; у свободного от дисторсии об'ектива оно равно $\frac{d}{\operatorname{tg} \alpha^1}$ (рис. 149). У большинства же об'ективов это не совсем так. Вследствие имеющейся дисторсии получаются различные значения для *f*, если рассчитывать его, исходя из различных точек на пластинке[2].

В некоторых об'ективах дисторсия очень мала, у других она доходит до нескольких сотых миллиметра.

Ясно конечно, что из-за температурных колебаний в фотокамере иногда могут произойти изменения во взаимном расположении об'ектива и плоскости пластинки и в расстоянии между ними.

[1] См. главы II и III этой книги.

[2] О дисторсии у различных фотографических об'ективов см. C. Pulfrich, Ueber Photogrammetrie aus Luftfahrzeugen, Jena, 1919.

Если работа происходит с безукоризненно сконструированными, хорошо юстированными фотограмметрическими камерами, то при правильном и осторожном обращении можно быть уверенным в получении хороших результатов. Во всяком случае следует не забывать принимать в расчет то, что каждая отдельная точка изображения, если учесть все возможные источники ошибок, может быть определена со средней точностью в $\pm$ 0,25 *мм*.

Отклонение в пределах той же величины наблюдается между положением главной и средней точек изображения (см. выше в примечаниях к фотограмметрической терминологии). Средняя точка изображения, как уже сообщалось, получается при пересечении линий, соединяющих противолежащие главные краевые марки. Ввиду того что марки или, правильнее, их изображения обычно передаются не с достаточной резкостью, то и определение положения средней точки изображения удается с точностью не большей, чем указано выше.

В наземной фотограмметрии угол $\theta$ (в точке стояния камеры), образуемый направлением на точку об'екта и оптической осью об'ектива, равен

$$\text{arc tg}\,\frac{x}{f},$$

причем $x$ измеряется от главной точки изображения до линии горизонта, а $f$ — это расстояние до изображения в камере.

Если $x$ или $f$ рассматривать как переменные величины, то

$$d\theta = \frac{dx}{f}\cos^2\theta \quad \text{или} \quad d\theta = \frac{df}{x}\sin^2\theta;$$

при этом независимой переменной в первом случае является $x$, а во втором — $f$.

Эти два уравнения позволяют оценить величину ошибки, которую можно ожидать при фотографическом измерении углов. Допустим, что $f$ равно 200 *мм*, а $dx$ и $df$ пусть будут равны 0,25 *мм*; если $\theta$ равен например 250, тогда $x = 93$ *мм* и

$$d\theta = \frac{dx}{f}\cos^2\theta + \frac{df}{x}\sin^2\theta = 5 \text{ угловым минутам.}$$

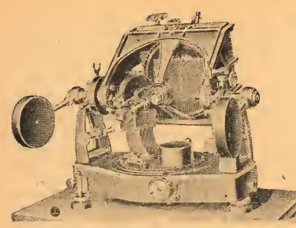
Это есть максимальная абсолютная величина ошибки $d\theta$ з дуговом выражении.

Если дело сводится к определению угла между различными ясно изображенными точками об'ектива, то положение оказывается несколько иным.

В аэрофотограмметрии возможные ошибки имеют большую величину по следующим причинам:

1. Камеры на самолете подвержены сильным колебаниям температуры; в силу этого расстояние до изображения нельзя считать величиной постоянной.

2. Так как камера самолета должна быть устроена таким образом, чтобы смена пластинок происходила автоматически, то никогда не исключена возможность того, что в некоторых случаях в момент с'емки пластинка окажется не там, где ей надлежит быть.



**150**. Теодолит для промера изображения Р. Гугерсгофа. Формат пластинки 13 × 18 = 18 *см*. Прибор служит для непосредственного получения вертикальных и горизонтальных углов в промеряемом изображении, снятых при любой ориентировке относительно горизонта (прибор построен фирмой „Aerotopograph“, Дрезден)

3. В течение экспозиции самолет не стоит, а движется; это движение складывается из поступательного движения и необходимого иногда в момент с'емки торможения или поворота самолета. Учесть перечисленные факторы при определении ожидаемых ошибок не так уж просто. Допустим, что скорость самолета равна 45 *м* в секунду, а экспозиция продолжается $^1/_{15}$ сек., тогда камера или, вернее, самолет за это время передвинется на 3 *м*. Если время экспозиции равно $^1/_{150}$ сек., то перемещение, происшедшее на этот промежуток времени, будет настолько мало, что им можно пренебречь.

При современном состоянии знания невозможно оценить величину результирующей ошибки, зависящей от всех источников ошибок, возможных при определении координат какой-нибудь новой точки. Несомненно только, что ошибка эта довольно велика. Поэтому фотограмметрия только тогда заслуживает право на существование, когда хотя бы в н у т р е н н и е элементы ориентировки фотограмметрической камеры установлены или вычислены без ошибок.

Промерить фотограмму можно также по методу Коппе[1]; по этому способу промеряют не координаты изображения, а сразу углы с помощью так называемого т е о д о л и т а д л я п р о м е р а и з о б р а ж е н и я (рис. 150). Этот теодолит соединяется либо с самой камерой, участвовавшей в с'емке, либо с камерой такой же конструкции, причем камера устанавливается в такое же положение относительно горизонта, какое она занимала в момент с'емки. Камера должна быть промерена и при промере должна лежать так же, как в момент с'емки она была расположена относительно горизонта. На рис. 151 изображена схема взаимного расположения камеры и теодолита.

Горизонтальная ось поворота зрительной трубы теодолита должна лежать в плоскости горизонта пластинки.

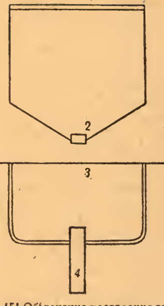
Преимущество способа Коппа заключается в том, что при пользовании им ошибки дисторсии об'ектива автоматически исключаются. Несомненно метод промера изображения по Коппу обла-

[1] См. C. P u l f r i c h, Photagrammetrie aus Luftfahrzeugen, G. Fischer, Уena, 1919

дает известными достоинствами, и среди них следует особенно подчеркнуть достигаемую точность и сбережение времени.

## Наземная фототопография. Полевая работа

При работе на местности прежде всего следует выбрать точку стояния камеры. Конечная цель фотограмметрической с‘емки заключается в том, чтобы фотографически снять промеряемую местность с двух различных точек. В гористой местности очень нетрудно выполнить эти условия, так как почти всегда легко отыскать две точки, с которых снимаемая местность доступна обозрению в большей своей части. Следует не забывать, что в большинстве случаев едва ли возможно сделать всю с‘емку нужной местности чисто фотограмметрическим, т. е. фотографическим, путем. Перед рекогносцировкой местности рекомендуется, пользуясь планом, хотя бы и неточным, приблизительно определить положение точек с‘емки, причем можно взять за правило, что эти точки должны быть только высоколежащие. Конечно такое правило не всегда пригодно; вероятно иногда придется избирать низко расположенные точки стояния, — в тех случаях, когда требуется получить особого рода снимки.




**151.** Об‘яснение построения теодолита для промера изображения по Коппу: *1* — пластинка; *2* — с‘емочный об‘ектив (или другой, подобный ему); *3* — точка вращения теодолита Коппа *4* — зрительная труба теодолита

Когда точка стояния определена, с помощью теодолита или мензулы проделывают сперва измерения, на основании которых можно сделать обратную засечку точки стояния. Одновременно определяют (теодолитом) вертикальные углы, исходя из нескольких важных точек изображения, которые должны быть помещены на снимке.

Эти наблюдения одновременно служат для контроля и определения внутренних элементов ориентировки камеры, для установления горизонтальности положения камеры при с‘емке и наконец для контроля при вычерчивании карты.

По окончании этих измерений на штатив вместо теодолита навинчивается камера и горизонтально устанавливается. Сначала удостоверяются в том, что охваченное камерой поле зрения и есть требуемое. Для этого пользуются видоискателем или же просто рассматривают изображение на матовом стекле. После этого в камеру вставляют кассету и затем освещают пластинку.

В наземной фотограмметрии пользуются ортохроматическими пластинками и строго желтым светофильтром. Степень диафраг-

мирования и продолжительность экспозиции зависят от многих факторов, а именно: от высоты точки стояния камеры, от времени дня, в которое происходит с'емка, от условий освещения, от характера заднего плана и т. д.

Во избежание затруднений при последующей работе по отождествлению, производимой уже в рабочем помещении, следует соответственно нумеровать протоколы теодолитных (и мензульных) наблюдений и фотографические снимки, относящиеся к отдельным точкам стояния камеры. Далее, рекомендуется с каждого места с'емки делать набросок заснятого участка, вносить в него названия завизированных опорных и контрольных точек.

Иногда во время работы на местности важно проверить положение линии горизонта, главной вертикальной линии фотограммы и наконец средней точки изображения. Последнюю, как уже известно, отыскивают по пересечению линий, соединяющих между собой главные марки измерительной рамки.

Проверка положения линии горизонта и главной вертикали делается следующим образом: отыскивают 3—4 заметных точки на горизонте, т. е. в горизонтальной плоскости, проходящей через об'ектив. Эти точки отыскиваются при помощи тщательно юстированной, направленной горизонтально зрительной трубы теодолита; ось, вокруг которой он поворачивается, должна быть на высоте об'ектива камеры.

Найденные таким путем точки фотографируются камерой: первый раз — при обычном положении камеры и второй раз, если конструкция камеры допускает, — в таком положении последней, при котором плоскость пластинки оказывается повернутой на 90° против первоначального положения. Таким путем в фотограмме оказываются две взаимно перпендикулярные линии: линия горизонта и главная вертикаль.

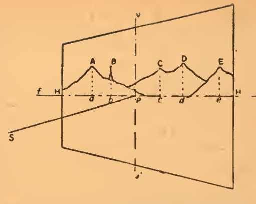
## Зарисовка плана

Одним из существенных преимуществ фотограмметрии является то, что бóльшая часть измерительной работы может быть проделана в комнате. Поэтому при пользовании этим способом существует значительно меньшая зависимость от погоды, чем при прочих общеупотребительных геодезических методах. Фотограмметрия — это геодезический метод, в основе которого лежат перспективные снимки, сделанные фотографическим об'ективом. Снимки, сделанные обыкновенными фотографическими камерами, хотя могут быть и очень интересными, но для геодезических целей не имеют никакого практического значения.

Конечно вполне возможно определить для любой фотограммы положение главной точки изображения и расстояние до изображения, если на снимке фигурирует пять точек, из которых в отношении трех известно их положение относительно горизонта, а в отношении двух — их положение относительно вертикали[1]. Теперь займемся построением плана на основании фотограмме-

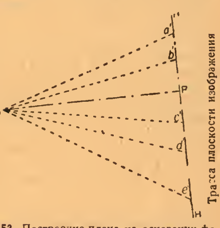
[1] См. W. Jordan, Handb. d. Vermessungskunde, 2, Stuttgart, J. B. Metzlersche Bushhandlung.

трических данных при условии, что внутренние элементы ориентировки камеры, а также ее место в пространстве известны и что в фотограмме можно отыскать изображение хотя бы одного пункта триангуляции. На рис. 152 изображена фотограмма, в которой передана тригонометрическая точка $B$; затем на снимке видны точки $A$, $C$, $D$, $E$, горизонтальное и вертикальное положение которых нам неизвестно. $S$ — место стояния; $P$ — главная точка изображения, $SP$ — расстояние до изображения; $Pa$, $Pb$, $Pc$, $Pd$ и $Pe$ — абсциссы точек изображения $A$, $B$, $C$, $D$ и $E$, отсчитанные от главной точки как от нуля. $HH'$ — линия горизонта, $VV'$ — главная вертикаль снимка. Все углы $SPH$, $SPH'$ $SPV$, $VPH$, $VPH'$ — прямые.




**152.** Фотограмма с нарисованной главной вертикальной линией и линией горизонта. $SP$ — расстояние до изображения (фокусное расстояние)

На куске кальки рисуем две линии, пересекающиеся под прямым углом, так называемый «каркас»[1] (см. линии $HH'$ и $SP$ на рис. 153).




**153.** Построение плана на основании фотограмметрических данных

На линии $HPH'$ (рис. 153) отмечаем отрезок $Pb'$, причем $Pb'$ по величине и по знаку равен участку $Pb$ на фотограмме (рис. 153), и соединяем $S$ с $b'$. Эта прямая продолжается за точку $b'$. Теперь кальку с каркасом накладывают на основной общий план, на котором нанесены как тригонометрические опорные пункты, так и фотографические точки стояния камеры. Прокалывают иглой точку $S$ (на кальке), устанавливают острие в точке $S$ на плане и и поварачивают кальку до тех пор, пока соответственно продолженная прямая $Sb$ не пройдет через тригонометрическую точку $B$ на плане. В этом положении калька укрепляется, и вкладыванием острия на плане отмечается положение $HH'$ и $P$. Затем калька

[1] Подобные „каркасы“ в напечатанном виде рекомендуется иметь в запасе для разных величин расстояния до изображения. Расстояние до изображения в данном „каркасе“ перед работой следует проверить ввиду возникающей иногда деформации бумаги.

удаляется и по плану твердым тонким карандашом проводится линия $HPH'$. После этого на фотограмму накладывается полоска бумаги и по ее краю отмечаются положение точек $a$, $b$, $c$, $d$ и $e$ на $HPH'$ (рис. 152).

Эти точки переносятся на линию $HH'$ в плане и соединяются с точкой $S$. Лучи, выходящие из $S$, должны пройти в плане через точки $A$, $C$, $D$, $E$. Следует отметить, что план чертится всегда в определенном масштабе, в то время как каркас наносится в натуральную величину. Поэтому точки $ABCD$ могут лежать по обе стороны от $HH'$, трассы плоскости изображения.

Если на основании фотограмметрических снимков нужно установить горизонтальное положение отдельных точек плана, то каждая заносимая на карту точка должна быть снята с двух точек стояния аппарата, расстояние между которыми называется базисом.

К этому надо добавить, что при графических способах вычерчивания карты, подобных описанным выше, угол, образуемый двумя соответствующими лучами, должен быть не меньше 20°.

В рис. 154 $A'$ означает проекцию точки $A$ на карте (плоскости горизонта); эта точка может быть получена как место пересечения двух соответственных лучей. $AA'$ есть высота точки $A$ над плоскостью горизонта, проходящей через объектив (при этом не приняты в расчет преломление в атмосфере и кривизна поверхности земли), $aa'$ — ордината $y_a$ точки $a$ на фотограмме; $S$, $P$, $HH$ попрежнему означают: точку стояния камеры, главную точку изображения и линию горизонта.

Поэтому

$$AA' : aa' = SA' : Sa';$$

$$AA' = \frac{aa' \cdot SA'}{Sa'}.$$

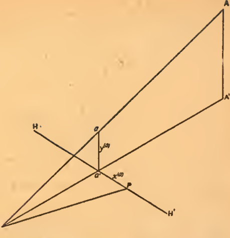
$SA'$ и $Sa'$ можно промерить в плане, а величину $aa'$ определить по фотограмме.

Так как при предшествующих расчетах мы совершенно не принимали во внимание преломления в атмосфере и кривизны поверхности земли, то и полученные значения $AA'$ не вполне точны. Точки, находящиеся на большом расстоянии, при рассматривании из $S$ вследствие кривизны земной поверхности кажутся расположенными ниже своего действительного положения. Поэтому при учете кривизны земной поверхности значения для $AA'$, найденные по вышеприведенной формуле, должны быть увеличены на некоторое количество, величина которого растет с квадратом отрезка $SA'$.

С другой стороны, вследствие преломления в атмосфере полученную высоту $AA'$ нужно уменьшить на некоторое количество, но так как влияние преломления лучей имеет меньшую величину, чем влияние кривизны земной поверхности, то при учете обоих влияний в результате получается увеличение непосредственно полученной разности высот. В каждом учебнике гео-

дезии, имеются таблицы, с помощью которых легко найти численные значения для учета указаииых факторов.

Теперь допустим (рис. 152), что точки *A*, *B* и *D* — тригонометрические точки, что положеиие главиой точки и главной вертикали изображеиия известиы, а иеизвестио положеиие точки стояния камеры. Лучи *Sa*, *Sb* и *Sd* можно наиести иа кальку и передвигать ее по плану во все стороны до тех пор, пока эти лучи окажутся проходящими через точки *A*, *B* и *D*; таким путем отыскивается на плане положение точки *S*.



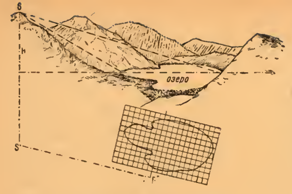
154. Определение высоты точки (в пространстве) над плоскостью горизонта, проходящей через об'ектив

Если же известно положеиие точки стояния камеры *S*, то положеиие главиой точки изображения узнается следующим образом: на плане проводятся лучи *SA*, *SB*, *SD* и поперек них кладется полоска бумаги, на которой отмечены точки *a*, *b*, *d* лииии горизонта *HH'* фотограммы; когда полоска улеглась таким образом, что точки *a*, *b* и *d* оказались лежащими на лучах *SA*, *SB*, *SD*, это положение полоски отмечают на плане марками и соединяют марки между собой. Соедиияющая их линия и есть *HH'*. Теперь опускают из точки *S* иормаль на лииии *HH'* Нормаль пересекает *HH'* в точке *P* — г л а в и о й т о ч к е и з о б р а ж е и и я.

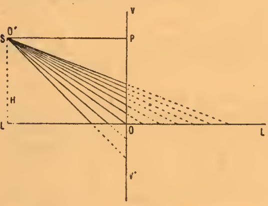
Встречаются случаи, когда на фотограмме изображена горизоитальная плоскость, например поверхность озера. Если точка стояния камеры при с'емке лежит довольио высоко над плоскостью, план озера можно построить, не впадая в ошибки, даже располагая всего одиой фотограммой. Высота над уровнем плоскости, вычерчиваемой на карте, до некоторой степени представляет в е р т и к а л ь н ы й базис.

Самое удобиое в этом случае—покрыть иаиосимую иа карту поверхность квадратной сеткой (рис. 155), линии которой параллельны или перпендикулярны трассе плоскости изображения, а затем в фотограмме построить перспективное изображение этой сетки.

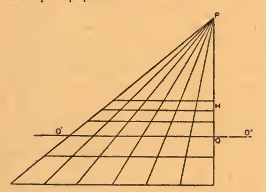
*VV'* на рис. 156 озиачает главную вертикаль фотограммы (при рассматривании сбоку); оптическая ось камеры пересекает эту линию в точке *P* (главной точке изображения). Поверхность озера (рис. 155) в этом снимке (вид сбоку) изображена линией *LL*, параллельной *SP* и лежащей ниже ее на отрезок *H* — высоту точки стояния камеры над поверхиостью озера; линия *LL* пересекает *VV'* в *O*. На лииии *LL* отмечают точки, в которых линия *LL* пересекается лииииями упомянутой выше квадратной сетки, парал-




**155.** Построение плана на основании только одного фотографического снимка



**156.** Построение плана на основании только одного фотографического снимка



**157.** Построение плана на основании только одного фотограмметрического снимка, Перспективный вид квадратной сетки плана

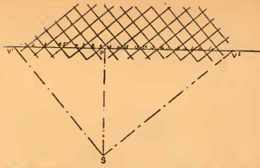
лельными линии горизонта фотограммы, и соединяют эти точки с *S*. В точках, в которых эти соединительные линии пересекают главную вертикаль, в фотограмме проходят перспективные изображения линий, параллельных линии горизонта в плоскости озера. Эти перспективные изображения параллельны линии горизонта, а также трассе плоскости изображения.

Линии, перпендикулярные в натуре к трассе плоскости изображения, имеют в изображении, как горизонтальные параллельные линии, точку схождения на линии горизонта, иногда же в главной точке изображения Р (рис. 157).

*P* на рис. 157 означает главную точку изображения, а $O^1O^2$ — линию пересечения горизонтальной плоскости, проходящей через поверхность озера, с плоскостью фотограммы. Расстояния между точками упомянутой выше квадратной сетки наносятся на $O^1OO^2$ в действительном, т. е. масштабном, размере; намеченные точки соединяют с *P*. Теперь наносим на *OP* отрезки, определившиеся на линии *VV'* (рис. 156), и через эти точки проводим линии, параллельные $O^1O^2$. Теперь у нас на фотограмме имеется перспективный вид квадратной сетки плана, и можно на основании фотограммы на-глаз дополнять план.

Встречаются планы (карты), выпускаемые с уже впечатанной в них

квадратной сеткой; такие карты часто используются для различных целей в военном деле; их легко дополнять на основании данных фотограмметрической с‘емки.




158. Построение плана с помощью квадратной сетки

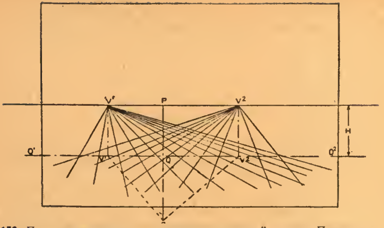
Рис. 158 представляет набросок небольшого участка квадратной сетки плана; точки стояния камеры $S$ и трассы вертикально стоящей плоскости изображения правильно расположены относительно квадратной сетки плана. Точки, в которых трасса изображения пересекается линиями квадратной сетки плана, отмечаются по краю бумажной полоски, на которой отмечены также точки $V^1$, $P$, $V^2$ (см. ниже). Теперь перед нами стоит задача построить в нашей фотограмме перспективное изображение квадратной сетки.

Через точку $P$, лежащую на трассе изображения (рис. 159), проводим перпендикуляр к последней и отмечаем на нем точку $S$ — точку стояния, полагая, что $PS = f$. На этом перпендикуляре $SP$ откладываем отрезок $PQ = H$ и через точку $Q$ проводим линию $Q^1Q^2$ параллельно трассе изображения; при этом $H$ равняется разности между абсолютными высотами точки стояния (об'ектива камеры) и плоскости озера. На рис. 158 мы провели через точку $S$ линии, параллельные линиям квадратной сетки плана, взаимно пересекающиеся в $S$ под прямым углом и встречающие трассу плоскости изображения в точках $V^1$ и $V^2$. Теперь накладываем упомянутую выше бумажную полоску с отмеченными на ней пересечениями линий сетки на линию $O^1O^2$ на рис. 159 таким образом, чтобы точка $P$ на бумажной полоске совпадала с точкой $Q$, и переносим на $Q^1Q^2$ точки пересечения линий сетки, а также точки $V^1V^2$.

В точках $v^1$, $v^2$ (на $Q^1Q^2$), соответствующих точкам $V^1V^2$, восстанавливаются перпендикуляры, встречающие линию горизонта (см. рис. 159) в точках $V^1$ $V^2$. Точки $V^1V^2$ — точки схождения линий сетки; если связать их с ранее отмеченными точками на $Q^1Q^2$, то в фотограмме получится перспективное изображение квадратной сетки плана (одну из точек схождения соединяют с точкой, имеющей четное обозначение, а вторую точку схождения — с нечетно обозначенной точкой (рис. 158 и 159). Остается добавить, что разность высот $H$ наносится в масштабе квадратной сетки плана или самого плана, а фокусное расстояние $f$ — в его действительном значении.

## Определение и проверка внутренних элементов ориентировки камеры

На основании полученных снимков при условии, что работа на местности проведена тщательно, можно точно определить поло-




**159.** Построение плана с помощью квадратной сетки. Получение в фотограмме перспективного изображения квадратной сетки

жение главных вертикалей и линии горизонта. Иногда при работах по составлению карты необходимо и желательно проверить расстояние до изображения. Определение расстояния до изображения или, что то же самое, фокусного расстояния возможно в том случае, когда в фотограмме имеются изображения **д в у х** известных тригонометрических точек.

Вернемся немного обратно, к рис. 154; мы видим, что высоту точки $A$ (представленную на рисунке линией $AA'$), над горизонтальной плоскостью, проходящей через об'ектив, можно вычислить из следующего уравнения:

$$AA' = \frac{aa' \cdot SA'}{Sa'};$$

поэтому

$$Sa' = \frac{SA' \cdot aa'}{AA'}, \quad \text{далее } Sa' = \frac{SP}{\cos a'SP} = \frac{f}{\cos a'\,SP}.$$

Таким образом получается, что

$$f = \frac{\cos a'SP \cdot aa' \cdot SA'}{AA'}.$$

Синус угла

$$a'SP = \frac{a'P}{Sa'} = \frac{x^{(a)}}{Sa'};$$

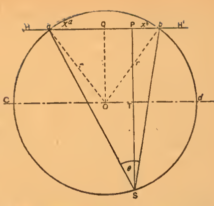
откуда определяется угол $a'SP$.

Таким образом, если разность высот между горизонтальной плоскостью, проходящей через об'ектив, и точкой $A$ известна, то можно вычислить $f$. Вычисление $f$ по этому методу рекомендуется только в том случае, когда в фотограмме имеется не менее двух тригонометрических точек, высота которых известна.

Если камера расположена таким образом, что изображение $A$

лежит на главной вертикали, то $\cos a'SP = 1$ (а самый угол $= 0°$) и

$$f = \frac{aa' \cdot SA'}{AA'}.$$




160. Определение расстояния до изображения фотограмметрической камеры по способу Ф. Хафферля

Расстояние до изображения, или фокусное расстояние, можно определить также и по способу Ф. Хафферля, если на пластинке изобразились две тригонометрические точки $A$ и $B$. Допустим (рис. 160), что $HH$ есть трасса вертикально расположенной плоскости изображения, $P$ — главная точка изображения, $Pa$ и $Pb$ ($x^a$ и $x^b$) — абсциссы точек изображения $A$ и $B$; кроме того из точки $S$ (точки стояния камеры) измерен горизонтальный угол $\theta$ между названными точками. Проводим через точки $a$, $b$ и $S$ круг, с центром в $O$ и рисуем линии $Oa$, $Ob$ и $OQ$, причем последняя перпендикулярна к $ab$; и наконец проводим линии $SP$, $Sa$ и $Sb$.

Тогда

$$SP = f = ST + TP.$$

Затем

$$TP = OQ = \frac{x^a + x^b}{2} \operatorname{ctg} aOQ;$$

$$\angle aSb = \frac{1}{2} aOb = \angle aOQ = \theta.$$

Поэтому

$$TP = \frac{x^a + x^b}{2} \operatorname{ctg} \theta.$$

Проводим через $O$ линию $cd$, параллельную $ab$; эта линия пересекает $SP$ в $T$. Так как $ST$ перпендикулярна к $cd$, то

$$TS^2 = cT \cdot Td = (r + OT)(r - OT) =$$

$$= (r + QP)(r - QP) = \left(r + \frac{x^a - x^b}{2}\right)\left(r - \frac{x^a - x^b}{2}\right);$$

откуда $TS^2 = \left(r + \frac{x^a - x^b}{2}\right)\left(r - \frac{x^a - x^b}{2}\right).$

$$TS = \sqrt{\left(r + \frac{x^a - x^b}{2}\right)\left(r - \frac{x^a - x^b}{2}\right)}.$$

$$r = \frac{x^a + x^b}{2} \operatorname{cosec} \theta.$$

## Применение описанных выше фотограмметрических методов измерения

Теперь разберемся, в каких случаях применение наземной фотографии может быть полезно и какое положение среди прочих способов геодезической с'емки занимает этот метод. Прежде всего надо сказать, что фотограмметрия не годится ни для катастральных с'емок, ни для с'емок в очень малом масштабе. В катастральной с'емке применяется очень большой масштаб и отдельные точки должны быть очень точно промерены (особенно необходимо это при межевых работах в лесной местности и в поселениях), в планах же, сделанных в малом масштабе, приходится пренебречь столькими деталями и должно быть проведено столько обобщений, что многие преимущества фотограмметрии совершенно не могут выявляться. Поэтому в таких случаях практичнее воспользоваться панорамной камерой, так как с'емка с помощью панорамной камеры связана главным образом только с транспортными и путевыми расходами. Таким образом фотограмметрия приложима главным образом только при картографической с'емке в среднем по величине масштаба, а также при технической с'емке (проектировании). Большим недостатком фотограмметрической с'емки является то обстоятельство, что некоторые пробелы в плане не могут быть выполнены исключительно путем фотограмметрической с'емки, так как даже значительное увеличение точек, с которых производится с'емка, не приводит к желаемой цели и к тому же становится экономически невыгодным. В таких случаях лучше прибегнуть к другим геодезическим методам с'емки.

Применение фотограмметрии в равнинных или мало пересеченных местностях не дает никаких существенных преимуществ. Областью широкого применения работ по этому способу с'емки являются гористые и трудно доступные территории.

Пользуясь фотограмметрическим методом, экономят в работе на местности, но зато увеличивается работа в помещении. Выше мы показали, что составление карт основано на использовании перспективных изображений снимаемой местности, которые довольно трудно промерить, в то же время при известном навыке они позволяют более совершенно охватить местность, чем это возможно с помощью например мензулы.

Фотограмметрический метод страдает тем недостатком, что во время с'емки невозможен самоконтроль (возможный например при мензульной с'емке). При некоторых обстоятельствах могут даже получиться довольно значительные ошибки, когда какая-нибудь точка местности определяется местом пересечения только двух лучей.

## Аэрофототопография

Первоначально аэроснимки делались с управляемых воздушных шаров и змейковых аэростатов. Результаты, полученные этим путем для целей геодезии, оказались неудовлетворительными.

Благодаря тому, что воздухоплавание в результате технических усовершенствований аэроплана пошло вперед невероятно быстрыми темпами, аэрофотография постепенно все больше и больше входила в употребление и оказывалась часто очень полезной. Мы постараемся сейчас пояснить существенное различие между так называемыми фотографическими серийными снимками (воздушными эскизными снимками) и подлинными аэрофотографическими планами.

Первые представляют собой ряд смежно расположенных вертикальных снимков, воспроизводящих узкую полосу местности. Для передачи больших участков местности эти серийные снимки не пригодны, так как сведение отдельных лент снимков в одно целое часто связано с большими трудностями. Серийные снимки несомненно оказывают большие услуги в военной обстановке, но их трудно промерять, так как не все изображения ленты имеют одинаковый масштаб. Довольно большие ошибки возможны также при совмещении в местах захода одного изображения на другое в отдельных снимках или в местах стыка. И наконец следует отметить, что такие воздушные эскизные снимки, которые ввиду всего сказанного приходится в общем признать довольно неточными, кроме того, по краю изображения большей частью страдают довольно сильными искажениями.

*Аэрофотограмметрические карты (планы)* строятся на основании сети опорных точек. Поэтому здесь можно столкнуться с накоплением ошибок, возникающих при сопоставлении отдельных снимков, равно как и с последствиями искажений, которыми страдают отдельные фотограммы. Ввиду этого аэрофотограмметрической с'емке должна предшествовать триангуляция. Относящиеся сюда работы описаны во всех книгах по геодезии, поэтому нет нужды подробно останавливаться на этом здесь. О количестве необходимых в каждом случае опорных точек мы поговорим еще ниже. Более подробные указания о необходимых для аэрофотос'емки аппаратах, о методике работы при с'емке, а также об обработке фотограмм с чисто фотографической точки зрения содержатся в следующей главе настоящей книги. Нашему дальнейшему изложению мы предпошлем следующие определения некоторых положений:

1. Первые камеры самолетов были (особенно в отношении оптики) выполнены недостаточно точно. Вначале довольствовались менее точными приборами, так как воздушная с'емка сначала применялась прежде всего на плоской местности. В этом случае вполне точное знание элементов ориентировки камеры не имеет большого значения.

2. До сих пор мы не располагаем безупречным способом приведения оптической оси камеры самолета в момент с'емки в совершенно определенное положение, т. е. точно фиксируемое положение относительно горизонта.

3. Мы не располагаем также способом точного измерения положения оси камеры относительно горизонта в момент с'емки.

4. Кроме того камера самолета должна быть снабжена приспособлением для быстрой и автоматической смены пластинок, что есте-

ственно может повести к различным ошибкам (в частности к неплотному прилеганию пластинки к измерительной рамке и т. д.). После изготовления фотограммы и составления на основе ее плана в последний вписываются названия мест и селений и наносятся разграничительные линии участков. Кроме того в план вносятся еще такие (природные или искусственные) об'екты, которые ввиду их малых размеров не могут быть достаточно ясно заметны на фотограмме и положение (и высота) которых поэтому определяется каким-либо иным путем.

В каких размерах надо произвести дополнительные работы, зависит от того, в каком масштабе должен быть выполнен план и каким целям он должен служить. К относящимся сюда подробностям мы вернемся несколько позже.

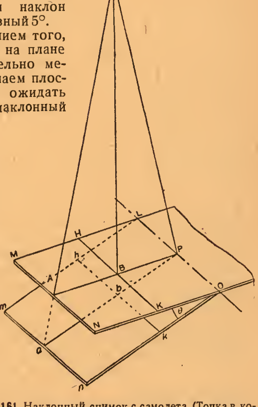
## Наклонный (невертикальный) воздушный снимок

При допущении, что пластинка в момент экспозиции лежит вполне точно горизонтально, а снимаемая местность горизонтальна и плоска, снимок с воздуха должен представлять собой безукоризненно точный план картографируемой местности. Во время войны было сделано много аэроснимков сравнительно больших территорий и на основании этих снимков были сделаны карты. Точные исследования показали, что почти все эти снимки с самолетов фактически были наклонными, а именно — угол наклона доходил до 10° и более. С другой стороны, оказалось, что при известном навыке пилот или наблюдатель в состоянии много сделать для того, чтобы удовлетворительно выполнить с'емку, т. е. провести ее так, чтобы снимок оказался очень мало наклонным относительно снимаемой плоской местности.

Аэрофотографию можно отнести к очень целесообразным геодезическим методам в тех случаях, когда дело сводится к картографированию плоских местностей в среднем масштабе, т. е. когда требуется дать план течения реки, устья реки, болотистой области, береговой линии, иногда городов. Если же измеряемая местность содержит также и холмистые участки, то очень уместно для дополнения плана воспользоваться и другими геодезическими методами (мензульной с'емкой, стереофотограмметрией, тахиметрией).

Ввиду того что в настоящее время мы не в состоянии ни придать фотографической пластинке вполне горизонтальное положение, ни указать с достаточной точностью величину наклона пластинки к горизонту, нам остается, большей частью основываясь на некоторых изображенных на снимке тригонометрических точках, выправить искажения снимка, т. е. превратить его в вертикальный. Конечно одновременно стремятся к тому, чтобы наклон пластинки в момент с'емки, пользуясь соответствующими механическими вспомогательными средствами, сделать возможно меньшим (от величины угла наклона пластинки к горизонту зависит, сколько опорных точек потребуется для выправления искажений снимка и какой метод выправления надлежит применить).

При беглом картографировании на основе с'емки с самолета в качестве предела вполне допустим наклон пластинки к горизонту, равный 5°. Теперь займемся исследованием того, в чем именно сказывается на плане наклон пластинки относительно местности, которую мы принимаем плоской, т. е. какие можно ожидать в плане ошибки, когда наклонный относительно местности аэроснимок рассматривать как вертикальный. Допустим, что *LMNO* на рис. 161 — фотографическая пластинка в таком положении, в каком она находится в с'емочной камере в момент экспозиции; *LmnO* будем рассматривать как уменьшенный в соответствующем масштабе план снимаемой местности, образующий с пластинкой угол $\theta$; *S* — место об'ектива („место стояния"); *P* — главная точка изображения фотограммы; *PA* — линия пересечения (трасса) вертикальной плоскости, проходящей через точку стояния и главную точку, с горизонтальной плоскостью, проходящей через главную точку изображения, т. е. с плоскостью пластинки; *LO* — ось наклона.



**161.** Наклонный снимок с самолета. (Точка, в которой продолжение линии *PB* пересекает линию *MN*, должна была бы быть обозначена буквой *A*)

Рассмотрим треугольники *SAP* и *SaP* и обозначим в них *AP* через $x$, *aP* — через $x'$, угол *ASP* — через $\varphi$ и угол *SaP* — через $\psi$. Можно написать, что

$$PAa = 180 - PAS = 180 - (90 - \varphi) = 90 + \varphi,$$

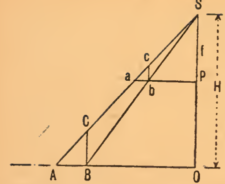
Согласно условию синусов, имеем:

$$\frac{x'}{x} = \frac{\sin PAa}{\sin\psi} \quad \text{или} \quad \frac{x'}{\sin PAa} = \frac{x}{\sin\psi};$$

поэтому

$$\frac{x'}{\cos\psi} = \frac{x'}{\sin(\pi - \varphi - \theta)};$$

$$x' = \frac{x}{\cos\theta - \operatorname{tg}\varphi\sin\theta};$$



162 Вертикальная с'емка неплоской местности

$$x' = \frac{x}{\cos\theta - \frac{x}{f}\sin\theta}.$$

Диференцируя это уравнение по $x$, получим:

$$dx' = \frac{\cos\theta \cdot dx}{\left(\cos\theta - \frac{x}{f}\sin\theta\right)^2}.$$

Из последнего уравнения легко вычислить, какое $dx'$ соответствует определенному $dx$ в каком-либо месте пластинки.

К таким же самым результатам приходим конечно, если допускаем, что плоскость пластинки наклонена к местности, которая горизонтальна. Формулы для $x'$, $dx'$ и т. д. будут различны в зависимости от того, примем ли мы за начало координат (в снимке) главную точку фотограммы или ее главную надирную точку. Подробное изложение всех этих вопросов можно найти у K. Hoecken Die Verzeichnungsfehler eines senkrecht aufgenommenen Luftbildes bei ebenem Gelende, ZS. f. J., 1927, 47, 189 (статья снабжена очень показательной номограммой).

Теперь займемся исследованием того, какие искажения получаются в фотограмме, когда снимок сделан вертикально, а местность неплоская и имеет углубления и возвышения.

## Влияние разности высот местности на координаты изображения в фотограмме

$BC$ на рис. 162 означает высокую дымовую трубу, передаваемую в фотограмме отрезком $ab$ ($cb$ можно рассматривать как рельефное изображение дымовой трубы). В таком об'екте, как дымовая труба, можно легко отличить изображение его основания, чего нельзя сказать относительно например основания холма. Из рис. 162 можно вывести следующую зависимость:

$$AB : AO = CB : H;$$

$H$ есть высота места, с которого произведена с'емка.

$$AB = \frac{AO \cdot CB}{H} = \frac{aP \cdot CB}{f}.$$

Так как чаще всего приходится иметь дело одновременно и с наклоном пластинки по отношению к местности и с наличием углублений и возвышений почвы данной территории, то необходимо учитывать оба влияния на положение точек изображения в фотограмме или положение точек плана.

Отсюда следует, что, если наклонный в действительности снимок посчитать за вертикальный, то это должно сказаться в сильном

искажении правильного положения точек плана. Подсчеты показывают, что наклон фотограммы на 5° при масштабе плана 1 : 20 000 может уже оказаться очень заметным, т. е. дать сравнительно большое искажение правильного положения точек. Поэтому при картографировании в масштабе 1 : 20 000 (или в большем масштабе) необходимо «выпрямление» аэрофотоснимков. Для грубых фотографических измерений местности достаточен следующий прием: от 6 до 12 отчасти перекрывающих друг друга фотограмм соединяются в одну общую ленту, и вся она «выпрямляется» на основании нескольких опорных точек, причем необходимо позаботиться о тщательном соответствии отдельных изображений. Ввиду того что при этом способе работы делается допущение, что все склеенные снимки имеют **одинаковый** наклон, что едва ли соответствует действительности, то способ это только тогда можно считать достаточно точным, когда требуется проделать беглые измерения в малом масштабе.

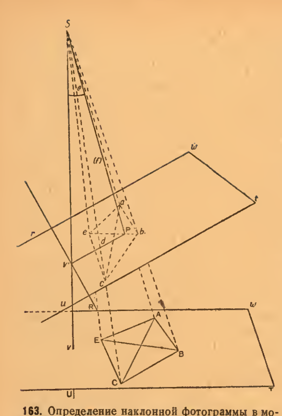
При получении такого рода аэрофотоснимков поступают следующим образом. Отдельные точки положенной в основу тригонометрической сетки взаимно отстоят друг от друга на 7,5—15 *км*. Самолет проходит по возможности прямолинейно над отдельными сторонами треугольников сетки; в это время делаются снимки. После того как фотограммы склеиваются в ленты, соответствующие сторонам треугольника, этим сфотографированным «сторонам треугольников» путем увеличения или уменьшения (план) придается правильное положение, соответствующее выбранному масштабу. После того как стороны треугольников сняты таким путем, делается вторая с'емка (полосами) лежащей между ними местности так, чтобы снимаемое пространство касалось сторон треугольника или тригонометрических опорных точек.

Описанный способ беглой с'емки очень хорош для участков в местности, которую трудно или вообще невозможно промерить путем наземной (также фотограмметрической) с'емки. Этим способом пользуются главным образом для заполнения пустых мест в карте и дополняют ее в каждом отдельном случае в тех участках, которые вышли недостаточно ясными в изображении: в качестве последней операции в лётную карту вписывают название мест и т. д.

В заключение укажем еще на один особенный источник ошибок при работе по этому способу. Высота полета аэроплана непостоянна. Если бы она колебалась в небольших пределах (около 30 *м* относительно «нулевой линии»), то получающиеся в результате этого ошибки были бы еще терпимы, но к сожалению большей частью высота полета имеет гораздо большие колебания.

### Определение наклона снимка, сделанного с самолета

Выше мы уже упоминали о том, что в нашем распоряжении до сих пор не имеется никаких приспособлений, с помощью которых можно было бы точно определить наклон камеры (пластинки) в момент с'емки; поэтому наклон пластинки приходится опреде-




**163. Определение наклонной фотограммы в момент с'емки**

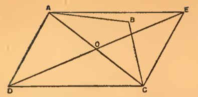
лять впоследствии (при работе в комнате) по фотограмме. Определение может быть произведено тремя методами. *1. Математический метод.* Допустим, что *S* (рис. 163) есть место об'ектива в момент с'емки, *RWTU* — снимаемая горизонтальная, плоская местность, *rwtu*—плоскость ее отражения, если смотреть со стороны об'екта. (Фотографическая пластинка находится по другую сторону от *S;* возникающее на ней изображение конгруентно отражению, видимому со стороны об'екта; для наших рассуждений проще оперировать последним.) *P* на рис. 163 — главная точка изображения. $SP = f$ — фокусное расстояние об'ектива, $V—V^1$ — надирные точки плана (местности), а также отражения, рассматриваемого со стороны об'екта. *A, B, C* и *E* — тригонометрические опорные точки в *RWTU*, а *a, b, c, e* — изображения этих точек в фотограмме. Направление и величина отрезка $PV^1 = d$ в изображении передают наклон снимка. Угол наклона снимка к горизонту θ.

$$\theta = \text{arc tg} \frac{d}{f}.$$

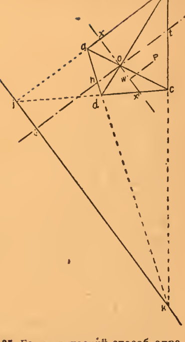
Для определения наклона камеры обычно достаточно трех тригонометрических опорных точек из тех, изображения которых могут быть найдены в фотограмме. Если имеется налицо четыре опорные точки, то этим обеспечено удобное исправление полученных результатов (путем обратной засечки) [1].

Из рис. 163 видно, что в пирамидах *SABCE* и *Sabce* углы, заключенные между лучами, идущими от *S* к точкам *ABCE* и *abce*, равны между собой. В снимке промеряются координаты *abce* относительно *P* (принятой за начало координат); величины углов *aSb*, *bSc* и т. д. можно определить, так как длина отрезка известна,

[1] L. P. Clerc, Applications de la photographie Aérienne, Paris, 1923.




**164.** Геометрический метод определения наклона фотограммы в момент освещения



**165.** Геометрический способ определения наклона фотограммы в момент освещения

Таким путем получаются координаты вершины пирамиды *ABCES;* ясно, что четырехугольник *ABCE* укладывается в этой пирамиде только в одном положении.

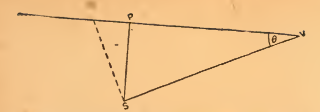
Мы схематически изложили метод, с помощью которого можно вычислять пространственные координаты места стояния (места с‘емки), а также наклон фотограммы относительно горизонта.

Для более подробного изучения соответствующих математических действий в этой части, отсылаем читателя к приведенной в конце главы литературе.

*2. Геометрический метод.* Известно несколько геометрических методов, с помощью которых можно получить величину и направление наклона аэрофотоснимка. Автор приводит здесь описание только одного способа, который, по мнению автора, является наиболее простым и рациональным.

*ABCD* на рис. 164 — это четыре тригонометрические опорные точки карты, изображения которых в фотограмме будут обозначены *abcd* (рис. 165). Строим параллелограмм *ADCE* со сторонами *AD* и *DC* и затем по способу «четырех точек», изложенному выше (см. рис. 144 и соответствующие места текста), находим в фотограмме точку *e*, соответствующую точке *E* параллелограмма. Затем соединяем *A* с *C* и *D* с *E;* полученные линии пересекаются в точке *O*. Соответствующие диагонали в снимке (*ac* и *de*) пересекаются в точке *o*. Принимаем, что *P* (рис. 165) — главная точка изображения. Если продолжим каждую пару противолежащих друг другу сторон четырехугольника *aecd* в снимке, т. е. *ad* и *ec*, а также *ae* и *dc* до точек пересечения *j* и *k*, то получится так называемый полный четырехугольник, «третья диагональ» которого *jk* должна быть горизонтальной линией. Постараемся доказать, что в действительности это имеет место.

Один из основных законов перспективы гласит, что третья диагональ всякого четырехугольника должна пересекаться с третьей диагональю всякого перспективного изображения этого четы-




**166.** Геометрический метод определения наклона фотограммы в момент с'емки

рехугольника. Третья диагональ параллелограмма, как известно, уходит в бесконечность. Поэтому плоскость, содержащая изображение этой третьей диагонали и центр перспективы, пересекается с плоскостью оригинала в бесконечности, т. е. параллельна ей. Поэтому третья диагональ $jk$ в рис. 165 представляет собой горизонтальную прямую. Для того чтобы перспективное изображение параллелограмма было тоже параллелограммом, плоскость снимка должна быть параллельна плоскости оригинала, т. е. должна пересекаться с ней в бесконечности; в этом случае ось с'емочного об'ектива должна быть перпендикулярна к обеим плоскостям.

Обычно линия $jk$ определяется не непосредственно, так как большей частью (т. е. при малом угле наклона плоскости местности к плоскости фотограммы) она вынесена довольно далеко наружу и потому точки $j$ и $k$ обращаются в очень остроугольные вершины. В таком случае лучше всего построить линию, проходящую через o и параллельную $jk$ и определить нормальное расстояние точки $o$ от искомой линии $jk$. Это делается таким образом: сначала пробно определяется положение линии, проходящей через o и пересекающей стороны $ae$ и $dc$ в точках $x$ и $x'$ таким образом, что $ox = ox'$. Линия, обладающая такими свойствами, должна быть параллельна линии $jk$ в силу следующей зависимости: всякий отрезок прямой, идущий от одной стороны параллелограмма к другой через точку пересечения диагоналей параллелограмма, делится в этой точке пополам. Отрезок прямой в перспективном изображении параллелограмма, обладающий тем же свойством, лежит в плоскости, параллельной плоскости параллелограмма оригинала, и потому параллелен перспективному изображению третьей диагонали четырехугольника.

Теперь от главной точки изображения $P$ проведем нормаль $xx'$ она пересечет эту линию $xx'$ в точке $W$.

$V$ на рис. 166 есть точка на линии $jk$, в которой $PV$, т. е. нормаль, опущенная из $P$ (главной точки) на $jk$, пересекает эту линию. $S$ — точка стояния (центр перспективы); $SV$ — горизонтальная прямая, проходящая через точку стояния, поэтому угол

$$PVS = \theta = \operatorname{arc\,tg} \frac{f}{PV},$$

причем $SP = f$, т. е. фокусное расстояние примененного об'ектива.

Теперь снова обратимся к рис. 165. Проведем линию $tohv$ перпендикулярно к $xx^1$ (эта прямая пересекает стороны четырхугольника $ad$ и $ce$ в точках $h$ и $t$, линию $xx'$ в точке $o$ — точке пересечения внутренних диагоналей, а прямую $jk$ в $v$).

По законам проекционной геометрии в полном четырехугольнике *adce* существуют следующие зависимости:

$$\frac{to}{oh}=\frac{tv}{hv} \quad \text{или} \quad \frac{to}{oh}=\frac{ov+to}{ov-oh},$$

поэтому

$$ov=\frac{to \cdot oh}{to-oh}.$$

Следовательно, когда *to* и *oh* в снимке промерены, можно вычислить и длину *ov*. Если к *ov* добавить отрезок *PW*, получится отрезок *ov* + *PW*, т. е. отрезок, обозначенный нами в рис. 166 через *PV;* таким образом:

$$\operatorname{tg}\theta=\frac{f}{PV}.$$

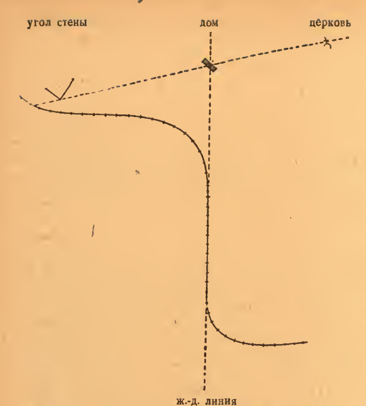
*3. Оптический метод.* Этот метод допускает в качестве условия, что внутренние элементы ориентировки с'емочной камеры точно известны; он основан на том, что фотографическое изображение правильно ориентировано по отношению к плану (карте).

Точка *S* рис. 163 понимается как малое отверстие, сквозь которое можно рассматривать план и его фотографическое изображение. Делаем допущение, что фотограмма заменена стеклянной пластинкой, на которой отмечены изображения тригонометрических точек; может существовать только одно определенное положение этой стеклянной пластинки по отношению к плоскости плана, при котором, если смотреть из точки *S*, тригонометрические точки плана и их изображения в фотограмме (или же на стеклянной пластинке) совпадают. Такое положение стеклянной пластинки определяется экспериментальным путем.

Для того чтобы восстановить соотношения в положении, существовавшие в момент с'емки, *PS*, как показывает опыт, должно быть равно расстоянию до изображения (фокусному расстоянию с'емочного об'ектива); поскольку упомянутая выше стеклянная пластинка имеет довольно ощутимую толщину, должно быть также учтено преломление лучей в ней.

Раз удалось придать правильное положение стеклянной пластинке, т. е. фотограмме, можно сначала определить точку *V* (см. рис. 163); соединив эту точку с *P*, легко определить угол наклона пластинки и камеры в момент с'емки.

Из описанных методов оптический и математический применимы и в том случае, когда тригонометрические опорные точки расположены на разной высоте. Обоими методами приходят к конечному результату путем постепенного приближения. Надирная точка фотограммы должна быть приблизительно установлена до того, как может быть учтено искажение, зависящее от различной высоты положения точек на местности. Таким образом надирная точка отыскивается в фотограмме «по этапам»; при этом искажения изображения, получающиеся вследствие различия высот на местности, учитываются тоже «по этапам».



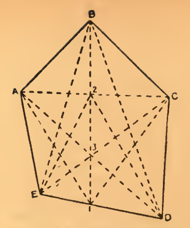

**167**. Построение плана на основании самолетных снимков

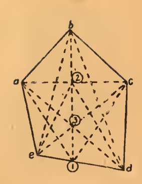
В последнем случае пользование геометрическим методом не совсем удобно: его можно рекомендовать только в том случае, когда все тригонометрические точки лежат на одинаковой высоте.

## Выпрямление изображения

Под *выпрямлением* фотографического изображения мы понимаем перепроектирование (трансформирование) наклонного снимка в горизонтальную плоскость, т. е. превращение наклонного снимка в вертикальный. Способ выпрямления зависит от дальнейшего назначения «выпрямляемого» изображения. В аэрофототопографии, используемой главным образом для дополнения и улучшения отдельных деталей на карте, конечно довольствуются простыми и менее точными способами выпрямления. Если же аэрофотоснимками пользуются для вполне точного измерения деталей, то отдельные наклонные снимки должны быть выпрямлены с наиболее возможной точностью.

При выпрямлении прежде всего делают допущение, что снятая часть земной поверхности представляет плоскость, однако необходимо математическим путем или с помощью механических вспомогательных средств учесть высоты отдельных контрольных






**168a и 168b.** Построение плана (карты) на основании снимков с самолета (аэроснимков)

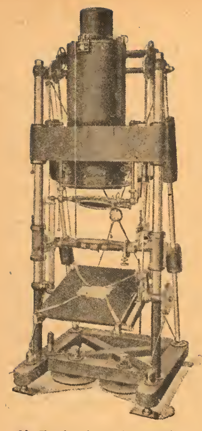
точек. В большинстве случаев самое простое — это, основываясь на приведенном нами выше первом основном законе перспективы, определять каждую отдельную точку на карте (плане) как место пересечения линий, проведенных между точками, уже внесенными в карту.

Если например требуется нанести на план еще не вошедший туда дом, проделав это на основании снимка с самолета, причем этот дом расположен в фотограмме приблизительно в точке пересечения линий, проведенных на рис. 167 пунктиром, то положение дома на плане определится по точке пересечения линий, соответствующих в плане этим пунктирным линиям.

Если в плане в фотограмме имеется достаточное количество соответственных точек, то положение других, видимых в изображении точек можно найти, основываясь на изложенном выше втором основном законе перспективы (по способу «четырех точек»). Если не преследуется бо́льшая точность плана, то в пределах небольших участков вполне допустимо работать пропорциональным циркулем; к этому следует добавить, что в наклонном снимке соотношения длин, взятые в параллельном и перпендикулярном направлениях к оси наклона фотограммы, неодинаковы.

Перспективные сетки легко строить, как мы покажем это ниже, при наличии в плане и в снимке пяти или более отождествляемых точек; если же в нашем распоряжении в плане и в снимке имеется только четыре такие точки, то пятая находится по способу четырех точек.

На рис. 168a *A, B, C, D, C* — точки плана, а на рис. 168b — *a, b, c, d, e* — соответственные им точки фотограммы. Соединяя каждую из точек *A, B, C, D, E* со всеми остальными, получаем сетку, в которой содержатся новые точки, как например *1, 2, 3*, которым в фотограмме соответствуют точки *1, 2, 3*. При рационально построенной и достаточно густой сетке можно иногда наносить точки на план, руководствуясь просто глазомером. Таким образом, если мы хотим построить в фотограмме перспективное



**169.** Прибор (трансформатор) для выпрямления наклонных снимков, сделанных с самолета (К. Цейсс)

изображение сетки (карты), то достаточно несколько точек фотограммы отождествить с соответственными точками карты; изображения остальных точек сетки определяются как точки пересечения линий, соединяющих соответственные отождествленные точки.

Приборы для аэрофотографических целей сконструированы по принципу камер-люциды, фотографической камеры, относящейся к началу развития фотографии. Этот прибор позволяет (с помощью соответственно подобранной призмы) накладывать друг на друга два изображения одного и того же предмета. В интересующем нас случае мнимое изображение аэроснимка или, вернее, изображенных на нем опорных точек будет проектироваться на план заснятой местности, т. е. на нарисованные в нем опорные точки. План натягивается на рисовальной доске нашей камер-люциды. Сконструированные для аэрофотографических целей различные приборы, будучи в принципе родственными камер-люциде, построены не настолько точно, чтобы давать результаты, вполне удовлетворительные для геодезических работ.

В прежних моделях этих приборов рисовальная доска, держатель снимка и призма были во всех направлениях подвижны. Так как эти приборы прежней конструкции были недостаточно прочно построены и их отдельные составные части отличались слишком большой относительной подвижностью, то обращение с ними было затруднительно, а получаемые в них результаты ни в коем случае нельзя признать точными.

Как уже сказано, выпрямление фотограммы с помощью прибора, построенного по типу камеры-люциды, возможно. Метод, которым при этом пользуются, занимает промежуточное положение между чисто начертательным и фотографическим способом (см. ниже).

Такой прибор допускает довольно всестороннее применение. За последнее время выпущены очень удобные фотографические выпрямляющие приборы (трансформаторы) для наклонных аэрофотоснимков; среди них упоминаем прибор для выпрямления Лизеганга-Егера, а также прибор Клауса Ашенбреннера, выпущенный о-вом Photogrammetrie в Мюнхене (рис. 169).

*Фотографический метод* выпрямления, несомненно, наиболее предпочтителен, так как с помощью его легко «перепроектируются» все детали снимка-оригинала. Перепроектированное изображение в состоянии заменить параллельную проекцию, и таким образом им можно пользоваться вместо плана (карты).

При фотографическом выпрямлении в первую очередь должны быть учтены основные законы перспективы. Таким образом, если в наклонном снимке линии пересечения видны на горизонте (представляющем собой горизонтальную линию), то при выпрямлении эта линия должна проектироваться в бесконечность.

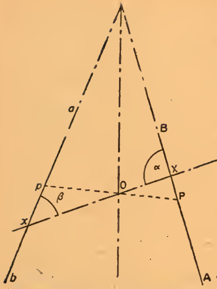
Это, другими словами, означает, что лучи, выходящие из центра перспективы и пересекающие упомянутую горизонтальную линию пересечения, горизонтальны и параллельны рисовальной доске (плоскости плана).

Положение проекционного об'ектива относительно плоскости плана или фотограммы определяется просто на основании приведенных выше третьего и четвертого законов перспективы и масштаба снимка (т. е. высоты самолета в момент с'емки). Если выпрямляемый снимок поместить на некотором расстоянии от проекционного центра, равном фокусному расстоянию с'емочного об'ектива, то фокусное расстояние проекционного об'ектива должно находиться в совершенно определенной математической зависимости от фокусного расстояния с'емочного об'ектива и масштаба фотограммы, т. е. высоты камеры в момент с'емки, поэтому проекционный об'ектив необходимо выбирать с совершенно определенным фокусным расстоянием. Так как подобный выбор часто невозможен, то необходимо подыскать для определенного проекционного об'ектива соответственные положения фотограммы и рисовальной доски, при которых будут соблюдены законы перспективы и требование резкого изображения фотограммы в плоскости плана.

Прежде всего мы в праве требовать, чтобы держатели снимка и плана в нашем приборе для выпрямления вращались около горизонтальных, взаимно параллельных линий, или же вообще около параллельных линий, являющихся осями наклона фотограммы, а также плана.

Углы наклона держателей снимка и плана по отношению к горизонту зависят от следующих факторов: от фокусных расстояний проекционного и с'емочного об'ектива, от угла наклона камеры к горизонту при с'емке, от масштаба снимка. Расстояние проекционного об'ектива (центра перспективы) от плоскости изображения плана зависит от угла, образуемого названными плоскостями между собой; и наконец место пересечения главных плоскостей об'ектива, изображения и плана должно представлять собой о д н у линию.

$O$ на рис. 170 есть центр перспективы, $P$ — главная точка изображения; отрезок $XP$ обозначаем через $r$, $XO$ — через $s$, $xO$ — через $t$. Далее: $f$ — фокусное расстояние с'емочной камеры, $f'$ — фокусное расстояние проекционого об'ектива, $m$ — масштаб плана, $\theta$ — угол наклона снимка, $H$ — высота об'ектива камеры в момент освещения.



**170.** Вывод зависимости положения держателя снимка, держателя плана и проекционного об'ектива при фотографическом выпрямлении наклонных снимков (при трансформировании)

Между этими величинами существует следующая зависимость:

$$\cos\alpha = \frac{f'}{Hm}\sin\theta$$

$$\cos\beta = \frac{f'}{f}\sin\theta$$

$$s = f'\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha}\right)$$

$$t = f'\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}\right).$$

$r = f\operatorname{cosec}\theta\ (\sin\beta\ \operatorname{cosec}\alpha - \cos\theta)$.

Подробный (и сравнительно простой) вывод этих уравнений читатель найдет у Mac Leod «Mapping from Airphotographs» (также см. литературу, указанную в конце настоящей главы). Вышестоящие уравнения приведены нами без дальнейших выводов из них с тем, чтобы показать, что интересующие нас величины можно вывести из д а н н ы х элементов.

Указанные уравнения нетрудно решить. Величину и знак угла наклона θ, легко определить при выпрямлении опытным путем, однако рекомендуется отыскивать величину угла θ еще до выпрямления одним из указанных выше способов, так как это действие отнимает меньше времени и потому рациональнее.

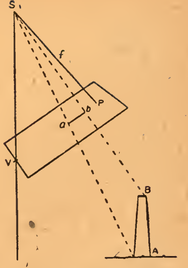
Держатель пластинки (снимка) в приборе для выпрямления должен вращаться около своей средней точки для того, чтобы линия горизонта, проходя через среднюю точку *P* фотограммы, действительно могла бы быть установлена горизонтально; затем держатель пластинки должен передвигаться вперед и назад относительно об'ектива для того, чтобы можно было помещать его на надлежащем расстоянии *S* от об'ектива (рис. 170). И наконец держатель пластинки в отношении подвижности должен обладать следующими возможностями: 1) двигаться в собственной плоскости с тем, чтобы в каждом отдельном случае можно было помещать *P* на правильном расстоянии *r* от *X* (от оптической оси); 2) двигаться около линии горизонта для правильной установки угла α.

Держатель плана прибора для выпрямления в отношении подвижности должен располагать следующими возможностями: 1) должен наклоняться около горизонтальной линии; 2) должен передвигаться вперед и назад относительно об'ектива.

(Первое движение служит для установки угла β, а второе — для установки величины $t = xO$.)
Само собой разумеется, что величина каждого движения (держателей как плана, так и снимка) должна прочитываться на шкалах.

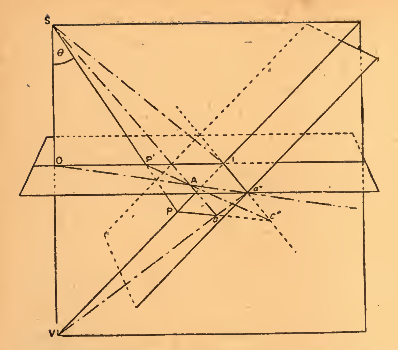
## Косые (наклонные) снимки

Выше мы занимались преимущественно вертикальными снимками, имеющими некоторый, обычно небольшой, наклон к горизонту. Такие снимки промеряются с помощью имеющихся стереоскопических приборов; эти снимки позволяют сравнительно просто измерять относительную разность высот на местности. В отличие от этого нам представляется еще более практичным просто делать косые снимки местности и совершенно так же, как в наземной фотограмметрии, определять каждую отдельную точку на местности как точку пересечения двух лучей, направленных из двух разных точек стояния. Относительные высоты точек определяются с помощью графических методов.




171. Косая с'емка дымовой трубы

На рис. 171 схематически изображена косая с'емка дымовой трубы, в которой отрезок $ab$ представляет изображение дымовой трубы $AB$; прямая, проведенная через $ab$, пересекает выходящий из $S$ перпендикуляр в точке $V$. В плане нас интересует положение точки $A$, изображение которой в нашем снимке есть точка $a$. При фотографировании дымовой трубы довольно легко отличить точку изображения основания; когда же дело касается косого снимка какой-нибудь горы или холма или же об'екта, основание которого недостаточно четко вырисовывается на фотограмме, отождествление точек основания сделать почти невозможно.
Теперь рассмотрим рис. 172. Точке $a$ в наклонной фотограмме соответствует точка $A$ в плане. Для того чтобы определить высоту точки $A$ в пространстве, необходимо иметь не меньше двух проходящих через нее лучей.
Проведем на рис. 172 линию $OA$. $S$ — это место нахождения об'ектива (в момент с'емки), $O$ — его надирная точка в плане, $V$ — его надирная точка в фотограмме, $P$ — главная точка изображения, $P'$ — точка в плане (в карте), соответствующая точке $P$.
Так как наш снимок косой (угол наклона θ), то плоскости карты и пластинки должны взаимно пересекаться, а именно по горизонтальной прямой ввиду того, что по условию плоскость карты горизонтальна. Соединим между собой точки $a$ и $V$ фотограммы. Полученная линия пересекает горизонтальную




**172.** Построение плана на основании косого фотографического снимка

линию пересечения плоскостей плана и пластинки в точке $a^v$. Если соединить точку $a^v$ с $O$ (в плане), то линия эта будет соответствовать в изображении линии $a^vV$. Какую бы высоту ни имела точка $A$ в пространстве, проходящая через $a$ прямая $Va^v$ всегда содержит изображение горизонтальной проекции точки $A$, и $Oa^v$ есть перспективное изображение $Va^v$ в плоскости плана. Теперь можно определить п р и б л и з и т е л ь н о е положение точки $A$ (в плане), пренебрегая ее относительной высотой (глубиной) над (под) плоскостью, служащей для сравнения.

Если положение точки $P'$ в п л а н е известно, то приблизительное положение точки $A$ при упомянутых выше ограничениях можно найти следующим образом. На плане проводим линию $P'a$, т. е. изображение на плане той самой линии фотограммы, которая проходит через точки $P$ и $a$.

Линия $P'a$ пересекает $Oa^v$ в $A$; эта точка пересечения в точности соответствовала бы точке $A$ в пространстве, в свою очередь отвечающей точке пластинки $a$, если бы точка $A$ лежала на самой плоскости сравнения, а не под и не над ней. Поскольку точка $A$ лежит над плоскостью сравнения, а не под нею, для определения положения точки $A$ необходимо сделать два снимка.

Рассмотрим на рис. 172 треугольник $SOA$; у точки $O$ он имеет прямой угол. Допустим, что линия $Oa^v$ пересекается в точке $A'$ (не изображенной на рисунке) лучом, выходящим из $S$; что точка $A'$ расположена ближе к $O$, чем точка $A$, и действительно являляется местом нахождения точки пространства, соответствующей

точке изображения *a*. Если из точки *A'* восстановить перпендикуляр, то отсеченный на нем лучом *SA* отрезок будет представлять собой высоту точки *A* в пространстве над нашей плоскостью сравнения (плоскостью карты). Если *A'* отстоит от *O* дальше, чем *A*, то точка *A* в пространстве расположена п о д плоскостью сравнения. Глубина нахождения под плоскостью сравнения определяется таким же путем, как и высота нахождения над ней.



173. Построение плана на основании косого фотографического снимка

Теперь рассмотрим рис. 173 и используем предшествующие рассуждения и выводы. Допустим, что фотограмма наклеена на большой кусок белой бумаги. Затем условливаемся, что величина и направление наклона снимка, а также положение главной точки изображения, равно как и линии пересечения фотограммы с горизонтом и главной вертикалью, известны и зарисованы.

Сперва определим точки *O* и *V* в главной вертикальной плоскости, перенесенной в плоскость фотограммы, а также линию пересечения плоскости карты с плоскостью фотограммы (эта линия пересечения должна проходить в фотограмме параллельно линии горизонта).

С этой целью откладываем на линии горизонта, начиная от точки *P*, отрезок $PS = f$, затем в точке *S* откладываем угол $\theta$ и таким путем на главной вертикали получаем точку *V*.

Треугольник *PSV* на рис. 173 соответсвтует идентично обозначенному треугольнику на рис. 172. Отрезок *SO* на рис. 173 соответствует высоте с'емочного об'ектива над плоскостью карты на рис. 172. Из точки *O* восстанавливаем перпендикуляр *K* линии *SV*, который пересекает линию *PV* в точке *1*, а *PS* — в точке *P'* и из точки *1* как центра описываем радиусем *1P'* и *1O* окружности, пересекающие *jV* в точках *(P')* и *(O)*. Точки *(P')* и *(O)* — это точки *P'* и *O*, перенесенные на главную вертикаль, что видно из рассматриваемого рисунка.

Через *I* проводим линию, параллельную *PS;* эта линия называется т р а с с о й п л о с к о с т и и з о б р а ж е н и я.

Теперь перейдем к построению п л а н а и воспользуемся с этой целью точкой *(O)* и трассой плоскости изображения. Сначала переносим точку *(O)* и трассу плоскости изображения в план и отыскиваем на трассе плоскости изображения точки, через которые надлежит провести соответственные лучи. Берем из фотограммы точку *a* (см. рис. 172); соединим *a* с *V*, продолжим ли-

нию $aV$ до пересечения с трассой плоскости изображения и обозначим точку пересечения через $a^v$. С помощью бумажной полоски переносим находящуюся на трассе плоскости точку $a^v$ в план. Затем соединяем $(O)$ с $a^v$ (в плане); на этом луче в плане должна лежать точка $A$, соответствующая точке $a$ фотограммы. Для приблизительного определения положения $A$ соединяем в фотограмме $a$ с $P$. Эта линия пересекает трассу плоскости изображения в $a^q$ Точку $a'$ соединяем с $P'$; эта соединительная линия пересекает $a^q$ $(O)$ в $A$. $A$ и есть приблизительное положение точки плана $A$, соответствующей точке изображения $a$ (высота точки $A$ не принята во внимание).

Теперь предположим, что положение точки $A$ в плане определено на основании другого косого снимка в точке $A'$, кроме того принимаем, что $A'$ и есть правильное положение точки $A$. Спрашивается, как же определить высоту $A'$?

На прямой $(O)a^v$ с точкой $(O)$ в качестве вершины строим треугольник $(O)(S)A$, соответствующий в рис. 172 треугольнику $OSA$. Из точки $A'$ восстанавливаем перпендикуляр к $(O)A$; сторона $A(S)$ треугольника отсечет на этом перпендикуляре отрезок $h$, соответствующий высоте точки $A'$ над плоскостью сравнения.

До выполнения всех указанных построений надо проверить, правильно ли ориентирована в плане линия $(O)(P')$. Простейший путь для этого следующий: путем построения удостоверяются в том, действительно ли лучи, которые выходят из $(O)$ и должны были бы пройти через одну или несколько нанесенных на плане и видных в фотограмме тригонометрических опорных точек, выполняют это условие или же нет. Ясно, что положение точки $(O)$ может быть проверено графически путем обратной засечки из двух или более тригонометрических точек, одновременно встречающихся и в плане и в изображении. Задачу можно решить также чисто математическим путем. Для этого предложено много способов (см. литературный указатель в конце главы), но так как имеющиеся в настоящее время с'емочные аппараты дают очень точные результаты, автор сомневается, имеет ли смысл пользоваться этими трудными математическими методами работы.

## Возможности аэрофотограмметрии

На основании современного состояния наших знаний все изложенное нами выше можно сформулировать следующим образом.

Каждому аэрофотографическому измерению должна обязательно предшествовать триангуляция снимаемой местности. Если предстоит картографирование плоской местности в малом масштабе, то стороны треугольников применяемой триангуляционной сетки должны иметь в длину не более 8 *км*. При очень точном картографировании требуются сетки треугольников со стороной приблизительно в 3 *км* длиной. Остальные контрольные точки определяются графическими методами из косых снимков. Как правило, косыми снимками пользуются для установления важней-

ших точек плана, т. е. для построения остова плана; детали плана при наличии ровной местности строятся на основании выпрямленных «вертикальных» снимков, а при наличии холмистой местности — на основании косых снимков, промеряемых описанным выше способом.

Когда план на основании например снимков с самолета готов, обходят снятую местность; наименования различных об'ектов заносятся в план, который при таком обходе кроме того контролируется. Хотя этот метод работы несомненно пригоден, все же сомнительно, действительно ли имеется смысл с экономической точки зрения проводить каждую крупную геодезическую с'емку аэрофотографическим или аэрофотограмметрическим способом. Каждому специалисту, работающему в области геодезии, известно, что современное аэрофотографическое измерение, пусть даже оно дает очень точные результаты, требует огромной работы в помещении. Эти трудности были бы устранены, если бы мы располагали вспомогательными средствами для точного определения угла наклона камеры или пластинки в момент с'емки; при этом самое наилучшее было бы иметь возможность вообще не допускать наклона пластинки, тогда не требовалось бы выпрямлять снимка, или же в случае, если косых снимков нельзя было избежать, — иметь возможность делать их при определенном и известном нам угле наклона.

Несмотря на эти, пока еще не устраненные трудности, было бы нецелесообразно воздерживаться от пользования аэрофотографическими методами измерения, так как при определенных условиях, на которые мы указывали выше, эти методы измерения могут принести большую пользу, а при известных обстоятельствах они представляют наиболее удобный и иногда единственно возможный метод с'емки.

## Стереофотограмметрические методы

Человек наделен способностью пластического зрения, т. е. он в состоянии воспринимать разницу глубины, так как глаза поставлены на некотором расстоянии друг от друга и при рассматривании отдельных точек какого-нибудь об'екта глазные оси каждый раз образуют различные углы (углы параллакса). Кроме того имеется еще ряд моментов, усиливающих нашу способность ощущать глубину, т. е. чувствовать разницу в глубине. Эти моменты следующие: знание действительной величины различных об'ектов, влияние теней, окраска об'екта и т. д.

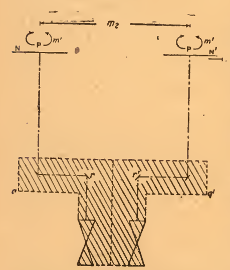
Результаты многочисленных опытов позволяют утверждать, что человек начинает ощущать разницу глубины между двумя точками об'екта, когда соответствующий угол параллакса доходит до ½ угловой секунды. Иногда эта величина не достигается, а иногда превышается.

Пользуясь стереофотограмметрией, не приходится производить никаких прямых измерений на местности; измерения производятся на основании двух фотографических снимков этой местности, снятых с концов промеренного базиса. Стереоскопическое



174. Об'яснение принципа стереоскопического рассматривания двух связанных между собой изображений (негативов)

впечатление может получиться только при рассматривании двух снимков, сделанных с двух различных точек зрения, если же рассматривать в стереоскоп два одинаковые снимка одного и того же предмета, то никакого стереоскопического впечатления не получается, так как лучи зрения, идущие к отдельным точкам об'екта, взаимно параллельны и не образуют никакого угла параллакса.



175. Об'яснение принципа стереокомпаратора (схематически)

Рассмотрим два изображения (негатива) $N$ и $N'$ (рис. 174), снятые с концов какого-нибудь базиса таким образом, чтобы глаза при рассматривании отстояли от них на расстоянии изображения при с'емке; лучи зрения, направленные на соответственные точки $a$ и $a'$ изображения точки $A$, сходятся и пересекаются в точке $A$, отвечающей точкам изображения $a$ и $a'$.

На рис. 174 схематически показано, как следует рассматривать негативы. Ясно, что угол параллакса (угол при точке $A$) равен $\theta-\theta'$(с учетом стоящих перед этими углами знаков)или же — равен:

$$\operatorname{arc\,tg} \frac{x}{f} - \operatorname{arc\,tg} \frac{x'}{f'};$$

когда $f=f'$, угол параллакса можно выразить просто через $x-x'$.

## Стереокомпаратор

Прибор, с помощью которого рассматриваются и промеряются полученные при с'емке фотографические пластинки, называется **стереокомпаратором**. Фирмой Цейсса выпущен сконструированный Пульфрихом стереокомпаратор, который с успехом может быть использован для различных целей.

Принцип устройства этого прибора ясен из рис. 175. $N$ и $N'$ — два негатива, снятые с концов промеренного базиса и вставленные в прибор. Лучи, выходящие из точек $P$ и $P'$ пластинки,

пройдя об'ектив падают на зеркала $q$ и $q'$, отсюда, отразившись, — на зеркала $r$ и $r'$ и, отразившись еще раз, попадают в глаза. Воспринимаемые глазом действительные изображения видимых в компаратор участков негативов увеличены по сравнению с соответствующими участками оригинального снимка в 3—6 раз (в обычной модели компаратора лучи, идущие от негатива, проходят ряд систем линз и обращающих призм).

На местах проектируемых об'ективами компаратора изображений (после прохождения через обращающие системы), т. е. в фокальной плоскости окуляров, помещены стеклянные пластинки, на которых нанесено по небольшой марке в форме шарика. Обе марки имеют совершенно одинаковую форму и величину; их стереоскопическое слитное изображение называется «блуждающей маркой».

Наблюдатель, смотрящий в стереокомпаратор, видит перед собой стереоскопическую модель изображенного на негативе ландшафта и сможет, как мы это покажем ниже, «промерить» эту модель, двигая пластинки определенным образом и измеряя величину этого движения.

Стрелки $m'$ (при точках $P$ и $P'$) на рис. 175 должны означать, что негативы $N$ и $N'$ для соответствующей юстировки могут поворачиваться вокруг главной точки изображения $P$ для того, чтобы главная горизонталь и главная вертикаль фотограммы заняли правильное положение. Обе пластинки посредством приспособления $m_2$ могут совместно двигаться вбок (влево и вправо). За начало координатной системы избирается л е в ы й конец базиса (иначе говоря, место нахождения левого глаза). Координатная система служит для пространственного определения отдельных фотографически заснятых точек об'екта. Соответствующим передвижением обеих пластинок $N$ и $N'$ точки изображения отдельных, следующих в порядке их места в пространстве, точек об'екта будут попадать под вышеупомянутые марки компаратора. Правая пластинка (правый негатив) посредством приспособления $m_2$ может быть передвигаема и сама по себе; последнее движение позволяет измерять угол параллакса. Оба негатива $N$ и $N'$ можно совместно приближать к биокуляру аппарата или удалять от него (возможность такого передвижения не показана на рис. 175); и наконец пластинки с марками, находящиеся в фокальной плоскости окуляров, тоже можно взаимно передвигать в стороны. (Это передвижение возможно только в старых моделях стереокомпаратора с помощью особого микрометрического винта.) Передвижение окуляров относительно друг друга позволяет приспособиться к различным расстояниям между зрачками у отдельных наблюдателей.

Благодаря имеющейся в старых моделях компараторов возможности передвижения пластинок с марками стереоскопически видимая марка оказывается на различных расстояниях, отвечающих углам схождения лучей, под которыми эти марки видны наблюдателю.

Промер фотограммы происходит следующим образом. Л е в о е изображение точки, место которой в пространстве должно быть

определено, помещается на оси левого микроскопа (левой половины стереокомпаратора); затем правый негатив с помощью приспособления для передвижения $m_3$ передвигается до тех пор, пока п р а в о е изображение определяемой точки об'екта не попадет на ось правого микроскопа (каждую половину стереокомпаратора можно с оптической точки зрения рассматривать как микроскоп). При этом передвижении правой пластинки об'ект или его пространственное изображение кажется перемещающимся или по направлению к наблюдателю или от него. Положение марки фактически остается неизменным, но у наблюдателя создается впечатление, будто об'ект неподвижен, а марка или приближается или удаляется от него. Величины, смещений $m_2$ и $m_3$, измеренные из определенных начальных точек и подставленные в определенные формулы, которых мы не приводим здесь подробно, позволяют определить положение промеренной точки в горизонтальном направлении. Высоты отдельных точек об'екта определяют по смещениям, претерпеваемым пластинками $N$ и $N'$ вперед и назад в плоскости, в которой они лежат (т. е. перпендикулярно к движению $m_2$). Эти движения необходимы для того, чтобы привести половинки изображений какой-либо попавшей в поле зрения точки на оптические оси обоих микроскопов стереокомпаратора. В современных моделях компаратора вместо перпендикулярного к направлению движения $m_2$ передвижения пластинок надлежащим образом передвигается вся оптическая система. В отношении отдельных деталей смотри брошюры о стереокомпараторе, изданные фирмой Цейсса в Иене.

Рис. 176 показывает, как на основании стереофотограмметрических данных и показаний компаратора в определенном специальном случае можно определить положение точки об'екта в плане. Пусть $O$ есть точка, положение которой в пространстве должно быть определено; $C$ и $C'$ — точки стояния с'емочной камеры на концах базиса $L$; $O^1$ — изображение $O$ на левом негативе $N$; $O^2$ — изображение $O$ на правом негативе $N'$.

$O^1C = f$ (расстояние до изображения в с'емочной камере).

$$\measuredangle COC' = \theta \text{ (угол параллакса)} = O^2C^1QD = L \operatorname{ctg} \theta = L \cdot \frac{f}{l}.$$

Здесь $L$ и $f$ константы, а $l$ промеряется (передвижением правого негатива).

Диференцируя последнюю из приведенных формул, можно определить влияние, оказываемое ошибкой в $l$ или $L$ на $D$ (перпендикулярное расстояние точки об'екта от базиса $L$):

$$dD = \frac{Lf}{l^2} \cdot dl; \qquad (1)$$

так как

$$l = \frac{Lf}{D}, \text{ то } dD = \frac{D^2}{Lf} df.$$

На расстоянии $D$ ошибка уменьшается с квадратом $l$ или возрастает с квадратом расстояния.

Если рассматривать $L$ как переменную, то

$$dD = \frac{f}{l}, \alpha L\ 2$$

и затем

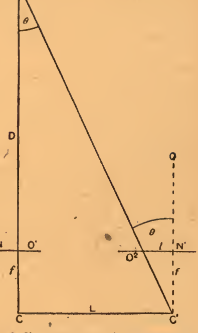
$$dD = \frac{D}{L}\ dL$$

или

$$\frac{dD}{D} = \frac{dL}{L}.$$

Таким образом можно утверждать, что ошибка в определении длины базиса влечет за собой пропорциональную ошибку в величине расстояния точки об'екта.

Стереокомпаратор, выпускаемый фирмой Цейсса, дает возможность измерять $l$ с точностью не менее 0,01 *мм;* общая ошибка в определении $D$ зависит также от того, какие ошибки возможны кроме того при работе на местности



**176.** К теории стереофотограмметрии

## Стереофотограмметрические работы на местности

Для работы на местности требуется один или два теодолита (или же соответствующе адаптированные камеры и нормально сконструированные теодолиты) и какое-нибудь приспособление для измерения базиса. Обычно помимо так называемых нормальных снимков, т. е. снимков, при которых оба негатива (на концах базиса) сделаны в одной плоскости, делаются отклоненные снимки, т. е. такие, направление с'емки которых отличается от нормального направления на определенный, точно установленный угол. Наклонные снимки при определенных условиях тоже можно промерять в стереокомпараторе.

Длина необходимого для с'емки базиса зависит, как мы видели, от того, на каком расстоянии по перпендикуляру отстоят от базиса самые отдаленные из снимаемых и наносимых на план точек. Эта длина обычно измеряется тахиметрически или с помощью измерительного жезла и базисного измерительного винта. Последний является составной частью цейссовского теодолита (принцип измерения в нем схож с тахиметрическим); он выполнен очень точно и позволяет работать с точностью до $^1/_{1000}$. До проведения снимка теодолиты юстируются точнейшим образом. Высоты мест, с которых производится с'емка, определяются посредством соответствующих геодезических измерений.

Левое место с'емки (слева для наблюдателя, смотрящего на снимаемый об'ект), как мы уже упомянули выше, принимается за на-

чало координатной системы, на которой откладывают координаты наносимой точки. Положение этой точки стояния камеры должно быть определено тригонометрическим путем, что обыкновенно делается по способу «обратной засечки» из трех или более тригонометрических точек (графически или расчетным путем).

### Работа в помещении

Эта часть работы может быть сделана с помощью стереокомпаратора, основные принципы устройства которого кратко описаны нами выше. Сейчас же мы приведем только несколько веских обоснований, почему работа с этим прибором дает столько преимуществ.

1. При работе со стереокомпаратором отпадает обременительная операция отождествления точек изображения в фотограмме — работа, связанная со столькими трудностями при так называемой мензульной фотограмметрии (интерсекционном методе) и влекущая за собой очень много неточностей.

2. В стереокомпаратор видна модель снимаемого об'екта (например ландшафта), поэтому картографирование горизонталей и деталей возможно даже при промере довольно ровной местности.

Из неудобств стереофотограмметрического метода можно назвать следующие:

1. Неот'емлемой характерной чертой всякого фотографического способа является то, что всегда определенные участки снимаемого об'екта остаются невидимыми с данного пункта с'емки.

2. При построении (нанесении) с помощью стереокомпаратора каждой отдельной точки плана требуется все же около 5—6 мин.; при этом рекомендуется давать различным наблюдателям делать в различное время контрольные измерения в целях исключения индивидуальных ошибок и получения безукоризненно точных результатов.

### Стереоавтограф

Важным достижением в развитии стереофотограмметрии явилось изобретение Е. Орелем стереоавтографа.

Стереоавтограф представляет собой механический добавочный прибор к стереокомпаратору, тесно связан с последним и, следуя его движениям, прямо вычерчивает планы с горизонталями.

На основании стереоснимков, с помощью стереоавтографа можно прямо наносить горизонтали, границы участков, потоки, линии железных дорог и вообще все детали местности. Такой способ работы естественно дает значительную экономию времени и позволяет элиминировать утомительные расчеты.

### Ценность и точность стереофотограмметрии

Среди фотографических (фотограмметрических) геодезических методов, стереофотограмметрия является наиболее точной. При наличии благоприятных условий можно достичь того, что относительная (горизонтальная и вертикальная) ошибка

при измерении положения определяемой стереофотограмметрически точки будет равняться $^1/_{1000}$; такую точность следует признать вполне достаточной. Так же точно, как и в других фотографических геодезических методах, и при стереофотограмметрической с'емке требуется геодезическая основа, т. е. триангуляция. Результаты, получаемые с помощью стереофотограмметрии, несомненно должны считаться превосходными.

Однако на пути широкого применения стереофотограмметрии стоят следующие препятствия:

1. Дороговизна необходимых приборов (фототеодолита, стереокомпоратора или стереоавтографа).

2. Связанный с большими трудностями, особенно в гористых местностях, выбор места для базиса и промер последнего.

3. Вес фотодеодолитов и прочего полевого снаряжения.

Преимущества стереофотограмметрического метода с'емки как при очень большом, так и при очень малом масштабе, к сожалению, незначительны, так как при этом надо учесть следующее: на планах в очень большом масштабе обычно хотят получить большую точность, что невозможно на планах, составляемых фотограмметрическим путем, принимая во внимание степень точности последнего метода; с другой стороны, на планах в очень малом масштабе невольно приходится пренебречь деталями. Можно вполне утверждать, что наиболее подходящими масштабами для стереофотограмметрической с'емки местности являются 1 : 10 000 и 1 : 40 000 (то же самое правило и в отношении других фотограмметрических методов измерения).

## Аэростереофотограмметрия

Само собой разумеется, что при с'емке местности с самолета стереофотограмметрия должна в принципе представлять те же преимущества, что и при наземной с'емке местности. К сожалению однако способы аэростереофотограмметрии остаются довольно сложными и вот почему:

1. Определить в пространстве место нахождения с'емочной камеры (об'ектива) в моменты экспозиции можно более или менее точно только на основании сравнительно сложных математических вычислений.

2. Приборы для промера этих снимков, — будет ли это автокартограф или аэрокартограф Р. Гугерсгоффа, стереоавтограф Г. Вильда (Швейцария) или стереопланиграф Е. Бауерсфельда (построен К. Цейссом), — насколько пока еще дороги, что о введении аэростереофотограмметрии в качестве всеобщего геодезического метода в настоящее время нельзя и думать.

Проблема аэрофотограмметрии значительно упростится с того момента, когда мы сможем придавать камере на самолете желаемое положение во время с'емки (самое удобное было бы иметь возможность делать *действительно вертикальные* снимки); кроме того мы должны уметь просто и безошибочно определять *высоту* с'емочного об'ектива в момент экспозиции и наконец необходимо, чтобы приборы для промера снимков были скон-

струированы просто, примерно не сложнее стереокомпаратора. На основании уже имеющихся многообещающих начинаний можно надеяться, что цель, к которой мы стремимся, сможет быть достигнута в сравнительно непродолжительном времени.

## Общие выводы

Все фотографические геодезические методы направлены к тому, чтобы по возможности точно передать в плане возможно большее количество деталей местности.

Каждый из описанных фотографических методов несомненно обладает особыми, свойственными данному методу преимуществами, но ни один из них нельзя считать пригодным во всех случаях при обширной геодезической работе; вернее будет сказать, что инженер-геодезист может по мере надобности в больших или меньших размерах пользоваться теми или иными из описанных фотографических методов для дополнения и уточнения своих работ.

Читателям, более подробно интересующимся деталями мензульной с'емки и стереофотограмметрии, рекомендуем следующие книги

## Литература


A. Laussedat, Recherches sur les instruments, les methodes et les dessins topographiques, Gauthier-Villars, Paris, 1898—1903.

L. P. Clerc, Applications de la photographie Aérrienne Doin & fils, Paris, 1920.

E. Dolezal, Die Anwendung der Photographie in der Messkunst, W. Knapp Halle a S. 1896.

A. Hay, Sehen und Messen. Die geom., phys. und physiolog. Grundlagen de Photogrammetrie, Stereoskopie und Stereophotogrammetrie, F. Deuticke, Leipzig und Wien 1921.

R. Hugershoff und H. Cranz, Grundlagen der Photogrammetrie aus Luftfahrzeugen, G. Fischer, Stuttgart 1919.

Bennett Melvill Jones und J. C. Griffilhs, Aerial Surveying by Rapid Methods, University Press, Cambridge 1925.

C. Pulfrich, Stereoskopisches Sehen und Messen, G. Fischer, Jena 1911.

C. Pulfrich, Über Photogrammetrie aus Luftfahrzeugen und die ihr dienenden Instrumente, G. Fischer, Jena 1919.

M. v. Rohr Die binokularen Instrumente, 2. Aufl., J. Sringer, Berlin, 1920.

T. Fischer, Über die Berechnung des räumlichen Rückwartseinschnitts bei Aufnahmen aus Luftfahrzeugen und Genauigkeitsuntersuchungen mit dem. Pulfrichschen Bildmesstheodolit, G. Fischer, Jena 1921.

Cl. Winchester und F. L. Wills, Aerial Photography, Chapman and Hall, Ltd., London 1928.

**9** ГЛАВА

# АЭРОФОТОС'ЕМКА

Ф. ЛОУС

## Введение

Во время мировой войны 1914—1918 гг. аэрофотография оказывала чрезвычайно большие услуги: ею пользовались как в маневренной, так и в позиционной войне в целях разведки, для установления произведенных противником перегруппировок войсковых частей, для ориентировки в новых возведенных противником укрепленных позициях, месторасположении артиллерии, железнодорожных линиях и т. д. На основании аэроснимков новые появлявшиеся об'екты вносились в имевшиеся карты; кроме того снимки с самолета использовались для улучшения и пополнения полевых карт, поскольку они были неправильны или содержали пробелы.

Во время мировой войны в области аэрофотографии, равно как и вообще в области воздухоплавания в целом, были сделаны чрезвычайно большие успехи. Достижения аэрофотографии в настоящее время ставятся на службу целям мирного времени. Области применения аэрофотографии следующие: 1) ландшафтная с'емка (одна из самых обширных областей применения); 2) геодезическая с'емка населенных пунктов; 3) составление планов водных бассейнов (рек), железнодорожной сети, плана улиц и т. д.; 4) составление карт побережья, когда нужно например установить положение обломков судна (дирижабля), морских мин, отмелей или когда нужно определить изменения береговой линии, вызванные углубительными процессами или напластованиями какого-либо рода (такие определения интересны также и с чисто научной точки зрения — при изучении морей) и т. д.

Ввиду того что в перечисленных областях аэрофотография служит до сих пор главным образом для военных целей, применяемые методы и аппараты держатся более или менее в секрете. В силу этого сообщение различных деталей представляет несомненный интерес.

К началу мировой войны все снаряжение английских военно-воздушных сил заключалось в нескольких зеркальных камерах и всего о д н о й передвижной темной комнаты, а в конце войны военно-воздушные части располагали невероятно обильными фотографическим снаряжением и делали ежедневно тысячи снимков. Усовершенствование и приумножение вспомогательных средств происходило постепенно и на основе потребностей, пришедших вместе с войной. Пилоты и наблюдатели во время производства с'емки или подвергались атакам других самолетов или же обстреливались зенитной артиллерией и потому не могли уделить полного внимания фотографической работе. По этим причинам производимые при с'емке манипуляции пришлось упростить настолько, чтобы, несмотря на враждебные действия, можно было ежедневно делать с самолетов множество снимков. Последнее стало возможно с момента постройки камер с автоматической сменой пластинок.

Прежде чем перейти к деталям, изложим некоторые основные свойства, которыми должна обладать аэрофотокамера, чтобы удовлетворять перечисленным выше условиям. Аэрофотокамера, предназначенная для военных целей, должна быть так сконструирована, чтобы с ней могли управляться и лица, не имеющие особых предварительных фотографических познаний и не прошедшие более или менее продолжительного обучения пользования этой камерой. Таким образом аэрофотокамера должна обладать следующими свойствами: 1) обращение с ней должно быть простое, 2) она должна быть крепко и прочно построена и 3) вес ее должен быть наименьшим.

При проявлении пластинок, копировании отпечатков и пр. необходим конечно, так же как и в остальных областях применения фотографии, определенный об'ем основных знаний по фотографической технике. Заметим, что проявление аэрофотоснимков требует особой тщательности.

В дальнейшем мы дадим очерк развития аэрофотографии за последние годы (преимущественно в Англии) и главное внимание обратим на аэрофотокамеру, на ее монтировку, применяемый негативный материал, светофильтры и фотографические об'ективы; подробно займемся также описанием способов аэрофотос'емки.

## Развитие аэрофотокамеры

Первой сконструированной в Англии подлинно аэрофотокамерой была ручная камера модели *А*. Она была сделана из красного дерева и обита латунью. Длина фокуса об'ектива равнялась 200 *мм*; камера имела твердую установку на бесконечность; затвор—щелевой, типа Герц — Аншютца, с переменной шириной щели. В этой камере пользовались пластинками формата $5 \times 4$ англ. дюйма (около $10 \times 13$ *см*) в бумажных кассетах Меккензи-Вишарта, которые можно было быстро и удобно менять в адаптере (тоже Меккензи — Вишарта). Упомянутые бумажные кассеты значительно меньше весят и не так громоздки, как обычно применяемые двойные и одинарные кассеты. Как сказано, они закладываются в

адаптер, неподвижно связанный с камерой. Когда заслонка адаптера открыта, пластинка готова к экспозиции. После экспозиции пластинка снова закрыта заслонкой так, что свет не может проникнуть. В соответствующем месте адаптера (у замка) имеется отверстие. Заглядывая в него до экспозиции, можно узнать, полностью ли открыта заложенная кассета или нет. Камера носилась на ремне, чтобы оставить руки свободными для обслуживания камеры. Для наводки пользовались простой металлической трубкой с натянутым крестом из нитей. Описанная камера обладает следующими преимуществами: 1) бумажные кассеты Меккензи — Вишарта открываются только в том случае, когда они правильно прилежат к заслонке адаптера; 2) когда пластинка приготовлена к экспозиции, нельзя снова взвести пружину щелевого затвора; 3) затвор освобождается только тогда, когда заслонка адаптера вдвинута до конца.

С описанной камерой нельзя получить лент снимков, перекрывающих друг друга, так называемых мозаичных. Отдельные снимки трудно об'единить по той причине, что при производстве каждого снимка камере непроизвольно придается неодинаковый наклон.

Само собой разумеется, стремились получать вертикальные снимки и вначале пробовали укреплять камеру снаружи бомбометательного механизма самолета. При таком способе получались вполне удовлетворительные результаты, но при этом пилоту приходилось преодолевать ряд еще бо́льших трудностей. Постепенно выяснилась необходимость в такой камере, обслуживание которой (по возможности несложное) почти совершенно не занимало бы пилота и не отвлекало его от управления самолетом. В результате возникла аэрофотокамера модель *С*.

### Аэрофотокамера модель С

Это — полуавтоматическая камера, схожая по устройству корпуса с моделью *А*, но вместо адаптера Меккензи — Вишарта снабженная механизмом для полуавтоматической смены пластинок. Затвор заводится одновременно с приведением в действие автоматического механизма для смены пластинок. Во время взведения щелевого затвора пластинки защищаются рулончиком, автоматически разматывающимся в промежутке между об'ективом и пластинкой. В этой камере применяются пластинки формата тоже 4 × 5 англ. дюйма (10 × 13 *см*) в металлической рамке. В каждом магазине помещается по 8 штук пластинок. После освещения пластинка переходит из верхнего (полного) магазина в нижний (собирательный) магазин.

Лицо, пользующееся этим аппаратом, при каждой с'емке просто устанавливает специальный рычажок камеры последовательно на три определенные марки. Этот процесс повторяется восемь раз, т. е. до тех пор, пока не используется весь магазин. Если надо продолжать с'емку, то нижний — наполненный — магазин снимается, верхний — опорожненный — ставится на его место, а сверху вставляется новый, предварительно заряженный магазин.

Аэрофотокамера модель *С* была несомненно прообразом последующих полуавтоматических камер. Действительно даже у самых современных аэрокамер мы встречаем некоторые из характерных для нее конструктивных признаков. Одним из самых больших недостатков этой камеры было то, что на шнуре, приводящем в действие затвор и проходившем снаружи самолета, осаждалась влага, что особенно неудобно в зимние месяцы, так как на больших высотах эта влага замерзала. В замерзшем виде шнур становился хрупким и легко ломался. То, что шнур помещался снаружи корпуса самолета, было связано с большими неудобствами и по некоторым другим причинам. Стремясь преодолеть эти трудности, пришли к мысли монтировать камеру внутри самолета. Но так как ни у пилота, ни у наблюдателя не было места для помещения камеры, ее оставили монтированной снаружи, но зато снабдили спусковым механизмом улучшенной конструкции. Этими приспособлениями снабжена модель *Е* аэрофотокамеры.

### Аэрофотокамера модель Е

Эта камера делалась из металла (исключая магазинную коробку). Заслуживает упоминания очень важное обстоятельство, а именно, что об'ектив этой камеры был подвижным; затвор был в точности такой же, как и у модели *А*, т. е. щелевой Гельца — Аншютца. Механизм для смены пластинок у этой модели устроен снаружи, сбоку камеры, в силу чего самая камера могла иметь довольно малые размеры.

Металлическая пластинка, служившая в других моделях для предохранения пластинки от света в тот промежуток времени, в течение которого она перемещалась для экспозиции из магазина в камеру, у этой модели заменена крышкой об'ектива, помещенной снаружи камеры. Эта крышка приводится в движение спусковым механизмом, соединенным со спуском щелевого затвора и действует таким образом, что об'ектив закрыт до тех пор, пока рычажок затвора опущен до отказа. Вместо имеющегося в модели *С* шнура здесь имеется привод с зубчатыми колесами, приводимый в движение гибким тросом.

Модель *Е* вскоре же вышла из употребления, так как пилот или наблюдатель при работе с этой камерой должны были уделять ей слишком много времени, — больше, чем это позволяли условия военной работы, а поэтому увеличивались шансы противника помешать фотографированию. Это создало необходимость так сконструировать аэрофотокамеру, чтобы обращение с ней отнимало как можно меньше времени.

### Аэрофотокамера модель L

Устройство этой камеры представляет значительный шаг вперед по сравнению с прежними камерами: камеру модель *L* можно было в любом положении укреплять и внутри и снаружи корпуса самолета. Ее можно было приводить в действие и от руки и автоматически, кроме того она была снабжена особым приспособле-

нием, с помощью которого автоматический пуск выключался при ручной работе и наоборот, при автоматической работе исключался ручной пуск. При автоматической работе этой камеры от пилота или наблюдателя во время с'емки требовалось только приводить в действие рычажок спуска. Первые экземпляры модели *L* были снабжены скальчатым поршневым спуском, укрепленным на коробке камеры, однако не оправдавшим себя, так как во время спуска получалось сотрясение камеры в момент с'емки. Более пригодным оказался ввиде рычага; в дальнейшем скальчатый поршневый спуск был снят с камеры и заменен рычажковым. При автоматическом пуске рычажок спуска, возвращаясь на место, приводил в движение механизм, служивший для смены пластинки и нового завода щелевого затвора. На эту операцию требовалось около 4 сек., по прошествии которых можно было делать следующий снимок.

Камера была снабжена предохранителем, который при автоматической работе (при смене пластинки, взводе затвора и т. д.) запирал спуск затвора.

Автоматическая операция протекала следующим образом.

Небольшой воздушный винт (пропеллер) приводится в движение воздушной струей; вращение винта при посредстве гибкого вала передается зубчатой передаче, которая по прошествии некоторого промежутка времени останавливается зубцом, помещенным в надлежащем месте. На протяжении этого времени части, связанные с зубчатой передачей, осуществляют смену пластинки и заводят затвор, после чего воздушный винт свободно вращается, т. е. не воздействует на весь механизм до тех пор, пока оператор не пустит затвор в ход. При движении затвора распрямляется пружина, которая освобождает упомянутый выше замыкающий зубец. Это освобождает зубчатую передачу, и все стадии операции повторяются в том же порядке.

Пластиночная магазинная кассета в модели *L* устроена совершенно так же, как у модели *C*; затвор, как у модели *C*, щелевой Герц — Аншютца (помещенный перед плоскостью пластинки). Во время смены пластинок последние защищаются от света об'ективной крышкой, которая во время экспозиции откидывается от об'ектива спусковым механизмом затвора.

Воздушный винт (пропеллер), служащий для приведения в движение механизма для смены пластинок, равно и гибкий трос укрепляются на подпорке в подходящем месте на самолете; гибкий трос протягивается обычно вдоль корпуса самолета и доходит до места, где сидит пилот. Если нужно привести камеру в действие от руки, то из рукоятки движущего механизма вынимается штырь и просовывается в дыру для троса приводящего механизма; таким образом автоматический движущий механизм стопорится, и его связь с рукояткой прекращается. Рычаг спуска, помещенный на распределительной доске у сидения пилота, одновременно приводит в движение счетчик, указывающий, какое количество снимков уже сделано.

Несмотря на то, что модель *L* аэрофотокамеры ни в коем случае не может считаться идеальной, она сравнительно долгое время

применялась при многих работах; многие ее преимущества мы обнаруживанием в модели *L B*.

### Аэрофотокамера модель F

Модель *F* была первой пленочной камерой; она приводилась в действие воздушным винтом (пропеллером), укрепленным прямо на камере, и помещалась с н а р у ж и аэроплана.
Скорость разматывания пленочной ленты можно было при помощи регулятора, приводимого в действие рычагом, держать в таких пределах, чтобы в секунду получалось требуемое в каждом отдельном случае число снимков. В камере монтировался компас и высотомер, показания которых в момент с'емки фотографически фиксировались на снимке.
Однако камера оказалась непригодной, и это обстоятельство послужило основанием к тому, что отдел аэрофотос'емки британских военно-воздушных сил, в котором помимо всего господствовало предубеждение против пленочных камер, окончательно отклонил пленочную камеру. В действительности же нельзя ни в коем случае говорить, что пленка не подходит для данных целей; можно даже, исходя из опыта минувшей войны, предположить, что в ближайшее время, когда появится целесообразно сконструированная пленочная аэрофотокамера, фотографическая пластинка в аэрофотографии будет совершенно вытеснена пленкой.

### Аэрофотокамера модель LB

Модель *LB* представляет собой видоизмененную модель *L*; она полуавтоматична, т. е. может приводиться в действие или от руки, или с помощью мотора (воздушным винтом). Точно так же, как и в модели *L*, освещение пластинки, непосредственно следующая за этим замена пластинки и взвод затвора производятся одним движением рычага спуска. Затвор помещается перед плоскостью пластинки. Футляр затвора представляет самостоятельную часть, и его можно вынуть из камеры, не вызывая какого-либо смещения остальных частей. Эта модель камеры представляет значительный шаг вперед по сравнению с прежними моделями, так как затворы этой камеры легко чинить и юстировать. До применения этой конструкции неподвижно укрепленные в камере затворы всегда причиняли гораздо больше затруднений, чем остальные части камеры. Особенно надо подчеркнуть, что в модели *LB* — в отличие от прежних моделей — об'ективы были с м е н н ы м и, в силу чего камера могла иметь чрезвычайно всестороннее применение. Для этой камеры были предусмотрены об'ективы с фокусным расстоянием от 10 до 50 *см*.
Дальнейшие достоинства этой камеры следующие: 1) пластиночный магазин легко отделяется от камеры; такое устройство может оказаться очень полезным в некоторых случаях (при внезапно возникшей опасности); 2) снаружи легко регулировать ширину щели затвора.

Прочие составные части конструкции этой модели в общем тождественны соответствующим частям модели *L* и потому не требуют особого описания.

Модели камер, описанные нами до сих пор, предназначались для пластинок формата 10 × 13 *см*; отдельные снимки в дальнейшем увеличивались. Само собой понятно, что снимки сделанные аэрофотокамерой, вследствие неустранимых сотрясений, причиной которых является мотор, могут страдать нерезкостью или обнаруживать какие-либо иные признаки движения, которые очень неприятно выглядят в увеличенном виде. По этой причине лучше и проще всего не пользоваться увеличениями, а приготовлять просто богатые деталями контактные копии с негативов большего формата, допускающие очень точное изучение снимков. Таким образом желательнее всего только большие форматы снимков.

### Аэрофотокамера модель ВМ

Эта камера представляет увеличенную модель *LB*. Формат пластинок здесь 13 × 18 *см*. Отдельные части камеры по сравнению с камерой *LB* несколько видоизменены, но в основном те же самые. Недостатком модели *ВМ* является ее большой вес и большие размеры. Модель *LB* вместе с магазином на 18 пластинок весит около 23 *кг*, а модель *ВМ* с магазином на 12 пластинок — 38 *кг*. Запасные магазины весят: 1 магазин камеры *LB* на 18 пластинок — 1,8 *кг*, 1 магазины камеры *ВМ* на 12 пластинок — 7,2 *кг*. В камере *ВМ* можно пользоваться об'ективами с различной длиной фокуса; для модели *ВМ* предусмотрены фокусные расстояния от 17,5 до 80 *см*. При с'емке об'ектов с большим числом деталей камера *ВМ* очень хороша.

Выше мы описали важнейшие автоматические камеры, а теперь перейдем к описанию более простых моделей аэрофотокамер, нашедших во время войны применение исключительно для военных снимков.

### Аэрофотокамера модель WA

Эта камера предназначалась для широкоугольных снимков, т. е. снимков, в которых должен быть изображен большой участок местности. В основном камера состояла из простого металлического тубуса конической формы, укрепленного на ящике камеры (со щелевым затвором перед плоскостью пластинки). Применялись пластинки формата 8½ × 6½ англ. дюймов (около 21 × 16 *см*), заложенные в двойные кассеты. Кассеты со шторной заслонкой следует предпочесть простым двойным кассетам с заслонками. Выдающийся край заслонки представляет то неудобство, что при наличии ограниченного места иногда заслонка может войти в соприкосновение с тросами управления. В этой камере применяются об'ективы с фокусным расстоянием от 20 до 25 *см*, устанавливаемые на бесконечность. Спуск затвора — косой хомутик; так же как и у автоматических камер, в этой модели для спуска употреблен гибкий трос. С этой моделью аэрофотокамеры получали отличные результаты, а именно — широкоугольные снимки, в некоторых случаях совершенно незаменимые.

### Аэрофотокамера модель В

Эта модель была предназначена в первую очередь для н а к л о н н ы х (косых) снимков. Такие изображения с художественной точки зрения производят лучшее впечатление, чем вертикальные снимки, но последние более ценны для картографических, проекционных и других целей. Модель *В* отличается от модели *WA* только об'ективом: в первой поставлен более длиннофокусный об'ектив. Применение аэрофотокамеры модель *В* давало также превосходные результаты.

### Ручная аэрофотокамера

Предположение о том, что неподвижно укрепленная аэрофотокамера совершенно вытеснит ручную камеру, не оправдалось; можно оказывать ценные услуги при получении косых снимков, когда требуется сфотографировать с самолета крупные здания, отдельные об'екты, другие самолеты и т. д. Ручные камеры, снабженные приспособлением, позволяющим измерять наклон камеры в момент с'емки, годятся и для технических геодезических снимков.

### Ручная аэрофотокамера модель А

Этот тип камеры, служившей довольно продолжительное время для целей рекогносцировки (главным образом косые снимки), постепенно вышел из употребления, так как дерево, из которого был сделан ее корпус, коробилось, вследствие чего происходило смещение об'ектива и связанное с этим ухудшение резкости изображения. Затруднения возникали в особенности в тропических странах. По этой причине модель *А* ручной камеры была вытеснена моделью *Р*, сделанной целиком из металла.

### Ручная аэрофотокамера модель Р

Эта камера состоит из конического алюминиевого тубуса, укрепленного на призматическом ящике. В ящике помещен затвор и механизм для завода затвора; кроме того он служит для вставления кассет с пластинками. В этой камере применялся об'ектив с фокусным расстоянием в 25 *см*, крепившийся на фланце тубуса ящика.

Камера устанавливалась на бесконечность. Она имела две рукоятки: одну — дугообразную — с левой стороны тубуса и другую — заступообразную — справа, на нижней поверхности вышеупомянутого призматического ящика.

Обе рукоятки складывались, что делало камеру портативнее. Затвор — щелевой, шторный — помещался п е р е д пластинкой; ширину щели можно было регулировать снаружи путем простого поворота кнопки; получавшуюся в результате ширину щели можно было прочитывать на особом циферблате. Приспособление для визирования состояло из латунной трубки с натянутыми крестами нитей на концах и крепилось на нижнем конце тубуса камеры. Та-

кое устройство визирного приспособления оказалось наилучшим; так как, пользуясь им, оператор мог несильно высовываться из самолета при наводке на снимаемую часть местности и тем предохранять себя от сильного движения воздуха. Смена пластинок производилась с помощью сменной кассеты Маккензи — Вишарта.

### Идеальная аэрофотокамера

Конструкторы до сих пор пытаются построить аэрофотокамеру, которая удовлетворяла бы по возможности всем требованиям, пред'являемым картографами и инженерами-геодезистами. На основании большого опыта нам известно, что последние только тогда могут извлечь пользу из аэрофотоснимков, когда эти снимки обладают достаточной резкостью.

Выше мы рассказали, какие изменения претерпела конструкция аэрофотокамеры в Англии в течение мировой войны. Теперь укажем, какие требования следует пред'являть к идеальной аэрофотокамере.

1. Аэрофотокамера должна быть легкой.
2. Аэрофотокамера должна быть по возможности компактной.
3. Смена пластинок, закрывание и взвод затвора должны совершаться автоматически; в целях получения перекрывающих друг друга снимков камера должна быть также приспособлена к тому, чтобы экспозиции могли автоматически следовать одна за другой с некоторым, определенным интервалом.
4. Во время различных манипуляций, необходимых как во время с'емки, так и после нее, центр тяжести камеры не должен смещаться; исходя из этих соображений, следует отказаться от помещения противовеса для вместилища пластинок или пленок.
5. Камера должна быть приспособлена к работе с об'ективами разного фокусного расстояния.
6. Светочувствительный слой негативного материала (пластинок или пленки) должен быть совершенно плоским, в момент с'емки он должен находиться в фокальной плоскости об'ектива и быть в точности перпендикулярным к оси об'ектива.
7. Затвор должен помещаться в самом об'ективе, т. е. должен быть центральным (диафрагма).
8. Размер снимков должен быть обычным, удобным; достоинством камеры будет, если с одной и той же камерой можно будет получать снимки размером начиная с $18 \times 18$ и до $8 \times 18$ *см*. Кроме изображения снимаемой местности на снимке должны быть видны также показания различных регистрирующих приборов, перечисленных в п. 9.
9. В аэрофотокамере должны иметься следующие регистрирующие приборы, показания которых при каждой экспозиции автоматически должны запечатлеваться на пластинке: a) компас, b) указатель наклона, показывающий отклонение направления оси камеры от вертикали; c) часы для указания времени (дня и часа) снимка; d) счетчик сделанных снимков; e) измерительная рамка для установления средней точки изображения.

10. Фокусное расстояние об'ектива должно быть точно известно, и величина его должна быть выгравирована на оправе об'ектива.
11. Камера должна быть снабжена приспособлением, при помощи которого оно могла бы быть точно установлена, например жироскопом.
12. Обращение с камерой должно быть возможно более простым, как при с'емке, так и при заряжении новым негативным материалом.
13. Камера должна быть сконструирована таким образом, чтобы ею можно было по желанию делать или единичные снимки или автоматически производимые серии снимков (чтобы в минуту можно было делать до 12 снимков).

## Монтирование аэрофотокамеры на самолете

Правильное монтирование аэрофотокамеры на самолете не менее важно, чем правильный выбор об'ектива для с'емки, так как совершенно невозможно получить годные снимки, когда камера помещена на самолете нерационально. Сначала в нескольких словах коснемся обращения с ручными камерами, о которых была речь выше.

При приведении в действие ручной камеры тело и руки оператора играют до известной степени роль подвесного приспособления. Последнее, какого бы типа оно ни было, в принципе должно быть устроено таким образом, чтобы вибрации самолета «затухали» в нем и не доходили до камеры. Оператор должен заботиться о том, чтобы его руки не соприкасались с корпусом или другими частями самолета, иначе колебания передадутся камере. Оператор твердо держит за ручки камеру обеими руками, раздвинув локти. Заднюю часть камеры (т. е. часть, содержащую кассеты) он держит на высоте лба, чтобы иметь возможность сделать необходимую наводку. Как только камера направлена на снимаемый об'ект, он кладет, не надавливая, палец на рычаг спуска и, насколько возможно, предотвращает передачу камере сильных толчков. Весь процесс очень напоминает опускание курка при стрельбе из ружья.

Монтирование камеры на самолете сопряжено с большими трудностями; этой проблемой конструкторы были заняты в продолжение всей войны.

Прежде всего необходимо заметить, что конструкция приспособления для крепления может быть основана на двух принципах: 1) камера жестко крепится на самолете и его колебания не тушатся приспособлением для крепления, 2) камера монтируется так, что она не ощущает толчков и колебаний.

С точки зрения практики в защиту жесткого крепления камеры можно сказать следующее: оно выполнимо просто и довольно часто дает хорошие результаты; с другой стороны, жесткое крепление камеры с внешней стороны самолета страдает двумя ясно выраженными недостатками: 1) скорость самолета страдает вследствие увеличения сопротивления; 2) колебания самолета передаются камере непосредственно, что конечно может со-

вершенно испортить снимок. Особенно ощутимы толчки и колебания при неравномерной работе мотора; например отказ одного из цилиндров дает знать о себе ясно выраженным сотрясением всего самолета, которое приводит к нерезкости сделанного как раз в этот момент снимка. Нерезкости обычно идут в снимке полосами.

Серьезно этой проблемой занялись только после войны и после многих опытов пришли к выводу, что наиболее подходящим способом крепления камеры является использование амортизаторов.

Первое крепление с «поглощением» ударов и толчков было испробовано на аэрофотокамере модель *E*.

В этом случае было применено 4 амортизатора в форме подставок для самого корпуса камеры. Кроме того были предусмотрены еще две подставки для тубуса об'ектива. По этому же образцу был создан тип монтировки, примененный к аэрофотокамере модель *L*.

С течением времени было испробовано множество различных видоизменений названной конструкции; все эти работы не завершились окончательными достижениями, но выявили важные конструктивные требования, которые должны быть в будущем разрешены. Первоначально кольцевидные подставки для камер снабжались резиновыми прокладками, но ряд поставленных опытов показал, что в этом случае при сотрясении в снимке получаются нерезкости. В целях устранения этого неприятного обстоятельства попробовали делать мытообразные подставки для камер, но и они не оправдали себя. В дальнейшем оказалось даже, что слишком толстые резиновые прокладки только вредят, так как являются причиной колебаний даже при стабилизированных подставках. Поэтому позже стали применяться деревянные подставки для камер с тонкими резиновыми прокладками, назначением которых было только недопущение непосредственного соприкосновения камеры с деревом. Эта конструкция была более жесткой, но, несмотря на это, она годилась для улавливания (поглощения) колебаний.

Несколько позже было разработано амортизационное устройство с использованием пружин, которые смещались параллельно друг другу, и все движения (сотрясения) самолета превращали в более или менее вертикальные движения, не так скверно отзывающиеся на снимке.

Пружины были устроены таким образом, что после некоторой несложной юстировки могли компенсировать вес любой из встречающихся камер.

Будущие конструкции крепления камер следует строить таким образом, чтобы камера не непосредственно соприкасалась с жесткими частями крепления, а чтобы между ними и камерой были проложены резиновые прокладки; в настоящее время выработано очень много систем подставок, приспособленных для различных типов камер.

В нескольких словах постараемся передать, как можно проверить пригодность приспособления для крепления камеры.

На аэродроме устанавливаются в одну линию на расстоянии 10 *м* друг от друга три яркие источника света. Среднюю лампу (при помощи соответствующего приспособления) можно автоматически зажигать и тушить через определенные промежутки времени. Самолет, снаряженный камерой, крепление которой должно быть испытано на отсутствие толчков, пролетает ночью с открытым затвором об'ектива над упомянутыми тремя огнями; при этом делаются снимки. Как уже сказано, средний свет через определенные промежутки вспыхивает и гаснет. По таким снимкам можно определить число колебаний крепления камеры в секунду.

## Об'ективы для аэрофотокамер

Для аэрофотографических с'емок употребляются преимущественно следующие типы об'ективов: «Тессар» фирмы Цейсса в Иене, «Икспресс» фирмы Росс в Лондоне, «Авиар» фирмы Тэйлор, Тейлор и Гобсон в Лондоне, большей частью с относительным отверстием 1 : 4,5 и фокусными расстояниями 200—500 *мм*; для беглой рекогносцировочной работы очень хорош об'ектив с фокусным расстоянием в 250 *мм*. Какую длину фокуса выбрать в каждом отдельном случае, решают в зависимости от того, каков характер предполагаемого снимка, т. е. с большим полем зрения и соответственно этому со сравнительно немногими деталями или же с малым полем зрения и множеством деталей.

Занимающийся аэрофотос'емкой прежде всего должен быть хорошо знаком со следующими понятиями: 1) фокусное расстояние об'ектива, 2) масштаб снимка (степень уменьшения), 3) поле зрения (часто вместо у г л а п о л я з р е н и я говорят о п о л е з р е н и я), 4) относительное отверстие при с'емке.

1. Эквивалентным фокусным расстоянием об'ектива называется расстояние фокусной точки, лежащей на оси, от второй (задней) главной (узловой) точки об'ектива.

2. Фокусное расстояние об'ектива определяет масштаб снимка. Два снимка, из которых один сделан об'ективом с большей длиной фокуса, а другой — об'ективом с меньшей длиной фокуса, но оба с одинаковой высоты, отличаются своей величиной, которая пропорциональна длинам фокусных расстояний примененных об'ективов. Если нужно определить масштаб снимка $M$, должны быть известны следующие данные: а) длина фокусного расстояния с'емочного об'ектива, в) высота места с'емки (точки стояния).

*Пример*: Длина фокуса об'ектива $f =$ *мм*; высота во время с'емки $H = 1\,500$ *м*.

$$M = \frac{f}{H} = \frac{250}{1 \cdot 500000} = \frac{1}{6000}.$$

Для практических работ вместо этой формулы рекомендуется пользоваться соответствующей номограммой. Приведенная формула вполне правильна, но только при условии, что ось камеры в момент с'емки строго вертикальна к снимаемой поверхности.

Для определения величины поверхности заснятого участка местности длину и ширину пластинки множат на величину, обратную

$M$ (в приведенном примере равную 6 000); получаемые таким путем числа есть длина и ширина заснятого участка местности; их произведение дает площадь этого участка. Приводимая ниже формула выражает эти соотношения: $f$ — длина фокусного расстояния об'ектива, выраженная в метрах, $H$ — высота во время с'емки в метрах, $b$ и $l$ — ширина и длина примененной пластинки тоже в метрах. Площадь охваченной снимком поверхности $F$, выраженная в кв. метрах, равна:

$$F = \frac{H^2 \cdot b \cdot l}{f^2}.$$

3. При установке камеры на бесконечность на матовом стекле (при условии достаточно больших размеров последнего) появляется более или менее большой круг с более или менее резкими очертаниями. Диаметр этого круга остается без перемен при любом диаметре диафрагмы. Упомянутый круг, как уже сказано, имеет предельную резкость не до самого края, по направлению к которому яркость сильно убывает. По этой причине практически пользоваться можно только внутренней частью круга изображения; эта часть называется используемым полем изображения. Путем диафрагмирования можно увеличить размеры используемого поля изображения. В аэрофотографии, где желательно работать по возможности с большим относительным отверстием, пользоваться указанным приемом не рекомендуется. Чем больше фокусное расстояние об'ектива, тем меньше при прочих равных условиях поле зрения зависит от фокусного расстояния об'ектива. Величина используемого поля изображения зависит от устройства об'ектива.

## Относительное отверстие об'ектива при с'емке

Продолжительность освещения пластинки при аэрофотографической с'емке должна быть минимальной, так как самолет непрерывно находится в движении. Для того чтобы за этот короткий промежуток времени как можно больше света прошло через об'ектив и упало на светочувствительный слой, необходимо работать с об'ективом с большим относительным отверстием. Ввиду того, что снимаемую местность можно в общем рассматривать как находящуюся в очень отдаленной плоскости, допустимо применение большого относительного отверстия без опасения того, что из-за этого пострадает глубина фокуса изображения. Об'ективы, сконструирование специально для аэрофотос'емки, вообще не диафрагмируются, — ими пользуются при наибольшем имеющемся в них относительном отверстии. При аэрофотос'емках пользуются затворами с возможно большими скоростями.

## Фотографические пластинки и пленки для аэрофотос'емки

Воздух не является вполне однородной, прозрачной для лучей средой; в нем наблюдаются следующие явления: 1) разные цвета белого света поглощаются не одинаково, 2) в воздухе происходит преломление лучей,

Даже в обыкновенной ландшафтной фотографии с помощью так называемых «обыкновенных» пластинок обнаруживается, что детали об'ектов, находящихся на большом расстоянии, разобрать на снимке нельзя. Расстояние до об'ектов, детали которых еще ясно различимы в снимке, зависит от большей или меньшей степени прозрачности находящихся между об'ектом и об'ективом воздушных слоев и прежде всего от большего или меньшего содержания в этих воздушных слоях пыли и влаги.

Обыкновенная пластинка особенно чувствительна к синим и фиолетовым лучам; лучи других цветов почти не оставляют на ней никакого следа. Для получения пригодных аэрофотоснимков необходимо пользоваться пластинками и пленкой, чувствительными не только к синим и фиолетовым, но и к лучам других цветов для того, чтобы передать в снимке об'екты, имеющие различную окраску. Для большего улучшения качества снимка применяют фильтры.

На основании этого можно заключить, что для наших целей несомненно больше всего будет подходить панхроматическая пластинка, так как на этой пластинке возможна правильная передача яркости различно окрашенных деталей об'ектов ландшафта. Для с'емки отдельных об'ектов, скрытых атмосферной дымкой, с большим успехом можно пользоваться пластинками, чувствительными к менее преломляющимся (красным) лучам. В хорошую погоду очень отдаленные предметы кажутся окутанными воздушной дымкой, особенно сильно рассеивающей синие и фиолетовые лучи; эти лучи обезвреживают желтым фильтром, который поглощает их и не допускает к светочувствительному слою.

В слегка туманную погоду слои воздуха пропускают преимущественно красные лучи света; в этом случае хорошие результаты даст соответствующе сенсибилизированная пластинка, чувствительная к красному. Перед ней нужно поставить фильтр, поглощающий все некрасные лучи или по крайней мере ослабляющий их; при упомянутых атмосферных условиях на обыкновенной пластинке ничего бы не получилось.

Для того чтобы удовлетворить требованиям аэрофотографии, рекомендуется, как правило, брать пластинку с «крутой» градацией (с сильным контрастом). Эмульсия должна быть возможно чувствительнее, одновременно как можно мелкозернистее и цветочувствительнее. Стеклянные пластинки должны быть плоскими и очень точно нарезаны по формату, так как плохо нарезанные пластинки могут вызвать задержки в работе механизма для смены пластинок.

Пользование для аэрофотографических целей пленкой можно рекомендовать не без некоторого ограничения; в этом отношении нужны еще некоторые опыты, так как наблюдения, сделанные во время войны, т. е. в совершенно особых условиях, не во всех отношениях дали положительные результаты. В первый раз пленочная лента была применена при введении аэрофотокамеры модель *F*, но тогда она оказалась непригодной. Учитывая военное назначение тогдашних аэроснимков, которые должны были быть

сделаны без риска неудачи, пользование пленкой было отклонено, и только в 1918 г. снова был проделан опыт работы с ней. Нельзя не отметить, что как раз в аэрофотос'емке пленка должна представлять ряд больших преимуществ.

### Стереоскопическая с'емка с самолета

Стереоскопические снимки, сделанные с самолета, заслуживают особого внимания и часто оказывают большие услуги. Ввиду того, что в стереоскопической с'емке сфотографированные детали кажутся рельефными, в них значительно легче разбираться. Об'екты кажутся расположенными в различных плоскостях и их об'емность ясно доходит до сознания наблюдателя. Многие места, о которых при обычном рассматривании нельзя достоверно сказать, возвышения это или углубления, на стереоскопическом снимке расшифровываются безошибочно, а это существенно облегчает картографирование на основании аэрофотоснимков. Стереоскопическое впечатление получается при рассматривании в так называемый стереоскоп (прибор с линзами или призмами) двух поставленных рядом снимков одного и того же об'екта, сделанных с двух смежных пунктов с'емки. Для получения обыкновенных (нормальных) стереоскопических снимков пользуются специально для этого сконструированными фотографическими аппаратами с двумя об'ективами, параллельно направленные оптические оси которых отстоят друг от друга на 65 *мм* (нормальное среднее расстояние между зрачками взрослого человека). Рассматривание обоими глазами стереоскопических фотографических снимков при определенных условиях может заменить непосредственное рассматривание заснятого об'екта.

При рассматривании какой-нибудь местности с очень большой высоты обоими глазами пластичность ландшафта отчасти утрачивается, так как в этом случае расстояние между глазами у человека очень мало по сравнению с отдаленностью об'екта. Поэтому необходимо увеличить взаимное расстояние с'емочных об'ективов: чем больше высота полета, тем дальше должны быть расставлены об'ективы.

Наибольшая пластичность впечатления достигается в том случае, когда стереоскопические половинки снимка на 75% взаимно перекрываются. При меньшем проценте перекрывания пластичность снимка получается утрированной. Иногда это является достоинством и делается умышленно.

Постараемся теперь установить, какое время ($t$) в секундах должно пройти между двумя аэрофотоснимками для того, чтобы было достигнуто определенное перекрывание ($U$, в *см*) обеих половинок изображения, если известны следующие данные:

$L$ — протяженность в длину фотографической пластинки в *см;*
$H$ — высота в момент обоих снимков в *м;*
$v$ — скорость самолета в м;
$f$ — фокусное расстояние об'ектива в *см*:

$$t = \frac{(L - U) \cdot H}{V \cdot f}.$$

Обычно очень редко случается, чтобы целый ряд снимков с самолета был сделан вдоль одной прямой линии. Поэтому до монтирования попарно следующих друг за другом снимков надо каждый раз определять линию полета, или б а з и с н у ю линию этих снимков. Это достигается таким образом, что оба снимка, средние точки которых были до этого определены, кладут сначала друг на друга таким образом, что они совмещаются, а затем снова раздвигают, причем надо следить за тем, чтобы в полученное взаимное расположение изображений не было внесено никаких изменений. Прямая, соединяющая средние точки находящихся в таком положении снимков, изображает линию полета, или базисную линию обоих снимков, и идет параллельно продольному направлению всего стереоскопического снимка. Половинка снимка, содержащая большой правый краевой участок, которого нет в обеих половинках, и будет правой половинкой стереоскопического снимка; левой половинкой соответственно будет половинка с левым краевым участком.

В аэрофотоснимках нет собственно верха; это обозначение здесь переносится на часть снимка, лежащего поверх найденной базисной линии.

Половинки изображения ни в коем случае нельзя спутывать, иначе получится п с е в д о с к о п и ч е с к и й эфект; это означает, что углубления на местности будут казаться на снимке возвышениями и наоборот.

По окончании описанной предварительной работы пригодные для стереоскопического рассматривания соответственные половинки снимка вырезываются и правильно (относительно базисной линии) взаимно ориентируются. Лучше всего, чтобы имеющиеся на снимках тени были направлены на нижний край картона, на который снимки наклеены.

Обе половинки снимка, т. е. их соответственные точки, помещают на расстоянии 63—68 *мм* друг от друга. Если сблизить их на меньшее расстояние, стереоскопический эфект от этого уменьшится. Для наших целей обычно предпочитают пользоваться фотографическими копиями с негативов-подлинников; наилучшие результаты получаются с мягкими, богатыми деталями, глянцевыми копиями. Небольшие различия в половинках снимка в смысле резкости и плотности не сильно заметны в общем стереоскопическом изображении. Стереоскопическое рассматривание правильно монтированных и хорошо подобранных стереоскопических половинок изображения производит очень большое впечатление и дает ценные сведения.

## Светофильтры: их назначение и применение при фотографировании с самолета

Применение светофильтров в аэрофотографии при пользовании панхроматическими пластинками представляет интерес не столько из соображений правильной передачи яркости цветов об'екта — для наших целей это имеет второстепенное значение,— сколько из

следующих соображений[1]: при получении снимков с самолета в первую очередь встает задача устранения влияния воздушной дымки, без значительного удлинения при этом экспозиции. Если делать с самолета снимки на панхроматических пластинках и не пользоваться фильтром, то изображениям нехватает яркости; они бедны контрастами и немного нерезки. Снимок происходит сквозь «воздушную дымку», т. е. сквозь слой посторонних мелких частиц (капель конденсирующегося водяного пара и пылинок), вследствие присутствия которых ультрафиолетовые, фиолетовые и синие лучи рассеиваются сильнее лучей, оказывающих более слабое химическое действие.

Так как все фотографические пластинки к лучам коротковолновой части спектра более чувствительны, чем к прочим лучам, то химически более активные, рассеиваемые высотной дымкой лучи воздействуют на светочувствительный слой интенсивнее зеленых, желтых и красных лучей: голубые лучи и являются причиной образования вуали и порчи изображения.

Само собой разумеется, необходимо принять меры к тому, чтобы ослабить действие химически более активных лучей, а прочие лучи пропустить к светочувствительному слою, не задерживая, и таким образом целесообразно использовать актиничное действие всех лучей (цветов) спектра на панхроматическую пластинку. Этот эффект легко достигается при пользовании подходящим светофильтром. Такой фильтр должен мешать фиолетовым лучам спектра действовать на фотографическую пластинку, а прочие лучи спектра пропускать. При этом время освещения не должно сильно увеличиваться, с. е. поглощение сине-фиолетовых лучей не должно быть настолько значительным, чтобы необходимое для компенсации его удлинение экспозиции могло мешать с'емке. Так называемые двухкратные и трехкратные фильтры, т. е. фильтры с фактором удлинения экспозиции 2 и 3, лучше всего отвечают нашим требованиям в аэрофотографии при условии, что их кривые поглощения имеют требуемую форму. Кривая поглощения фильтра должна конечно соответствовать примененному сорту пластинок Фильтр, срезающий большую часть синих и фиолетовых лучей, выполняет здесь полностью свое назначение. Для снимков с самолета годятся фильтры например «Лифа» №№ 149, 150, 151 и 152 (два последних по Мите).

Пользуются или просто окрашенной желатиновой пленкой или окрашенной желатиновой пленкой, заложенной между стеклянными пластинками; в первом случае лучше всего помещать фильтр в плоскости диафрагмы об'ектива, а во втором — укреплять его каким-либо наиболее удобным образом перед об'ективом (фильтр в оправе с навинчивающимся кольцом).

### Фотографирование с самолета

В настоящее время с'емка с самолета с чисто фотографической точки зрения не представляет никаких особенных трудностей,

[1] О применении светофильтров в различных отраслях фотографии см. главы „Микрофотография“ и „Фотография в металлургии“ настоящей книги.

так как применяемые камеры приводятся в действие большей частью довольно просто. Наиболее трудной задачей является «уловить» на снимок как раз те точки или участки об'екта, которые являются предметом с'емки.

Известны различные типы аэрофотографической с'емки (отдельные, серийные и мозаичные снимки), с каждым из них связана особая техника с'емки. Хорошие результаты всех таких снимков зависят от того, насколько опытны и ловки пилот и наблюдатель и насколько хорошо согласованы их совместные действия.

Перед тем как самолет поднимется для с'емочного полета, нужно дать себе ясный отчет, все ли из того, что необходимо для фотографирования, находится на борту и в состоянии, готовом к действию. Со всей категоричностью надо подчеркнуть, что юстировка, а тем более починка приборов в воздухе или чрезвычайно трудна или вообще невозможна.

Перед вылетом должны быть проделаны следующие операции в указанной здесь последовательности:

1. Очень тщательно заряжаются магазинные коробки с пластинками, или кассеты. Эта работа совершается в темной комнате. При пользовании панхроматическими пластинками требуется совершенно особенная осторожность. Отпечаток пальца на пластинке часто может испортить какую-нибудь очень важную часть снимка. Не по размеру нарезанные пластинки откладываются, так как они часто являются причиной помех и портят механизм для смены пластинок.
2. Осматривается об'ектив.
3. Проверяется механизм для смены пластинок и подготавливается к действию.
4. Затвор устанавливается на нужную скорость.
5. Камера укрепляется на подставку.
6. Дают себе отчет в том, действительно ли подставка в состоянии поддерживать камеру, и проверяется, отвесно ли направлена оптическая ось об'ектива.

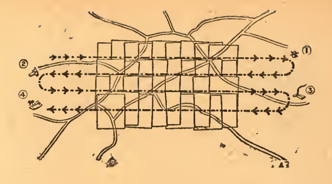
Способ обращения с камерой во время с'емки зависит от типа камеры, поэтому здесь этой стороны дела касаться не будем.

### Получение отдельных снимков

Под отдельными снимками разумеются снимки, которые должны содержать определенные точки местности,— мост, перекресток дорог и т. п. Получение таких снимков является одной из самых трудных задач.

Когда самолет достиг высоты, с которой должен быть сделан снимок, убеждаются в том, что ось камеры отвесна и направлена на подлежащий с'емке об'ект. Вертикальное направление оси камеры контролируется по ватерпасу, пользование которым особенно рекомендуется.

Если в момент с'емки самолет наклонен, то может случиться, что пилот или наблюдатель видят снимаемый об'ект отвесно под собой, камера же в это время направлена совсем в другую сторону и нужный об'ект вообще не окажется на пластинке.




**177.** Схематическое изображение серийного или мозаичного снимка. Линия полета обозначена пунктиром со стрелками: 1, 2, 3, 4 — пункты ориентировки для летчика

### Получение серийных снимков

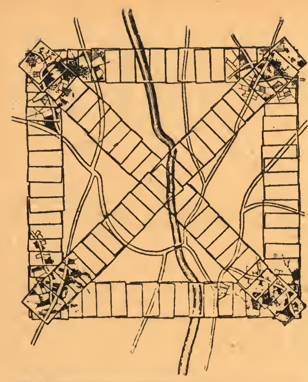
Так называемая серия снимков состоит из ряда перекрывающих друг друга снимков, последовательно снятых во время полета. Для предотвращения пробелов в подобном ряду рекомендуется делать снимки с таким расчетом, чтобы они до половины перекрывали друг друга. Серийные снимки удобны для получения так называемых «аэрофотопланов» линий железных дорог, рек, каналов и улиц; они полезны также при установлении линии побережья и прилива. Такие аэрофотопланы (фотокарты) богаты деталями; обыкновенный план той же местности не дает такого живого впечатления. По формуле, приведенной в том месте, где говорилось о стереоскопической с'емке, можно рассчитать, сколько должно протечь секунд между отдельными снимками для того, чтобы при определенных условиях происходило перекрывание одного снимка другим.

Если снимки до половины перекрываются, то каждые два смежные снимка можно рассматривать стереоскопически. При серийной с'емке обычно летят по возможности по направлению ветра. Встречный ветер легко сбивает самолет с взятого им курса, в результате чего в серии снимков получаются пробелы, пополнить которые впоследствии очень трудно. Гораздо практичнее повторить весь ряд снимков, чем пытаться повторить какой-нибудь один (недостающий) снимок, что удается только в исключительных случаях.

### Получение мозаичных снимков

Возможность получения так называемых мозаичных снимков зависит от многих условий. Если например требуется сделать мозаичный снимок местности, с которой имеются уже хорошие планы и которая содержит много об'ектов, могущих служить точками ориентировки для летчика, эта задача не представляет каких-либо особенных трудностей. Если же надо снять фотокарту с мало расчлененной (очень однообразной) местности, например

берег, лес и т. д., то здесь вопрос сложнее. Там, где местность благоприятствует, проще всего пролетать от одного ориентирововочного пункта до другого; естественно, что при таком полете требуется хорошая погода и прозрачный воздух.



**178.** Схематическое изображение мозаичного снимка, т. е. нескольких серий снимков

После установления наиболее удобных об'ектов для ориентировки в полете (на основании уже имеющегося плана) с помощью приведенной выше формулы определяют необходимые промежутки времени между отдельными снимками (для получения нужной степени перекрывания) и сначала прямолинейно пролетают участок между двумя пунктами ориентировки. Дойдя до второй ориентировочной точки, поварачивают и летят в противоположном направлении по полосе, смежной с только-что пройденной полосой местности. Эту операцию продолжают указанным образом до тех пор, пока вся снимаемая местность будет покрыта соприкасающимися полосами.

На рис. 177 показано, как надо пользоваться описанным методом. При получении серий снимков самолет должен держаться все время на одинаковой высоте. Если при прохождении какой-нибудь из полос, самолет из-за ветра несколько отклонится от взятого направления, то примыкающую параллельную полосу пролетают с таким расчетом, чтобы она частично перекрывала первую.

При изготовлении фотокарты местности, плана которой пока не имеется совсем и которая бедна пунктами ориентировки, поступают следующим образом. Сначала пролетают по краям снимаемого участка, а затем по диагоналям образовавшегося таким путем четырехугольника. Тогда получается «остов» фотокарты, облегчающий дальнейшее ее оформление (рис. 178). Для проверки точности фотокарты, сделанной на основании серийных снимков, можно воспользоваться косыми снимками.

## Литература

См. литературу, приведенную в конце предыдущей 8-й главы.

**10 ГЛАВА**

# ЦВЕТНАЯ ФОТОГРАФИЯ

В. УАСТЕЛ

Цветная фотография охватывает настолько большую область, что в рамках одной главы настоящей книги можно дать лишь краткий очерк ее основных принципов. Кроме того мы постараемся сжато изложить, каким образом цветная фотография применяется в различных областях.

Уже в ранние периоды развития фотографии обнаружилось стремление получать с помощью фотографии цветные изображения. Это желание особенно поддерживалось тем, что иногда на обыкновенных (т. е. не окрашенных) дегарротипиях местами можно было наблюдать цвета (в особенности красноватые оттенки), которые вероятно должны быть об'яснены интерференционными явлениями. Однако долгое время работа в этом направлении не дала сколько-нибудь значительных результатов.

В 1906 г. братья А. и Л. Люмьер получили английский патент на свою превосходную автохромную пластинку. «Автохромная пластинка» была наилучшей, но далеко не первой пластинкой с цветным растром. Хотя транспарантные снимки на пластинках с цветным растром и по сей день должны считаться лучшими цветными фотограммами, а способ их изготовления может быть назван почти «механическим», они к сожалению до сих пор недостаточно оценены в различных областях практической, научной и художественной работы.

Идеальная цветная фотограмма должна выглядеть по возможности как изображение на матовом стекле камеры. Практически этот идеал достигается при хорошем снимке на растровой пластинке; конечно хотелось бы, что такой же результат с той же легкостью получался прямо на бумаге. К сожалению в этом направлении пока имеется еще мало достижений.

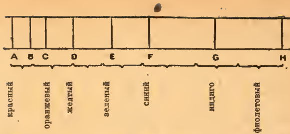
Часто приходится слышать довольно распространенное неправильное мнение, что французского физика Липпманна надо считать изобретателем цветной фотографии, так как ему в 1891 г.

удалось прямо с помощью камеры получить неисчезавшее изображение солнечного спектра с правильной передачей цветов. По этому поводу надо заметить следующее: 1) „изобретение" цветной фотографии не может быть приписано одному человеку; 2) современные методы цветной фотографии в такой же мере развились из предложенного Липпманном способа, в какой применяемая в настоящее время фотография происходит от дагерротипии. Метод Липпманна состоял примерно в следующем: светочувствительный тонкий слой хлористого серебра он приводил в контакт с ртутным зеркалом и достигал таким путем того, что лучи, пройдя слой хлористого серебра, отражались от поверхности ртутного слоя и обратно возвращались в слой хлористого серебра. Так как прямо падавшие и отраженные лучи интерферировали, то в слое хлористого серебра образовывались так называемые *стоячие* световые волны, т. е. волны, которые, не продвигаясь вперед, колебались вверх и вниз на одном и том же месте. Так как самое сильное действие сказывалось на самых высших (и низших) точках максимумов (и минимумов) волн, то после проявления в этих местах хлоросеребряного слоя оказывались слои серебряного осадка, взаимное расстояние которых зависело от длины волны действовавшего света. При рассматривании полученного изображения в отраженном свете (в падающем свете оно выглядело, как обыкновенный негатив) в надлежащем положении (для рассматривания применялись специально сконструированные приборы) можно было видеть цвета, послужившие причиной образования отдельных слоев, действовавших теперь отражающим образом. Способ Липпманна безусловно можно назвать гениальным и очень интересным с точки зрения физической оптики (теории света), но с практической точки зрения слишком сложным.

Интерференционные цвета (которые и используются в способе Лаппманна) можно наблюдать в мыльных пузырях, перламутре тонких слоях масла и воды и т. д.

Как уже сказано, практически приемлемые методы цветной фотографии основаны не на интерференционных явлениях, а в большей мере на тщательном изучении состава и разложения света, а также на теории трехцветного восприятия цвета. Для усвоения практически применяемых методов цветной фотографии требуется знание некоторых основных положений, которые мы сейчас и постараемся кратко изложить.

Если пучку белых лучей дать пройти сперва узкую щель, а затем стеклянную призму, то оказывается, что различные лучи, из которых состоит белый свет, обладают разной преломляемостью; поэтому из призмы они выходят в виде расходящегося пучка и на белом экране (проекционной поверхности) дают окрашенную полосу — *спектр*. В действительности имеется бесчисленное количество цветов, среди которых Ньютон выделил 7 цветов или, правильнее, 7 частей спектра, особенно отчетливо доходящих до сознания наблюдателя. Эти *основные* цвета расположены в спектре в следующем порядке: красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий, индиго, фиолетовый. Часто при перечислении основ-




**179.** Призменный солнечный спектор с фраунгоферовымн лнниямн

ных цветов индиго опускается, так как не всякий наблюдатель отчетливо различает этот цвет.

Полоса спектра в действительности длиниее, чем может восприиять человеческий глаз. Подобно тому как человеческое ухо ие в состояиии восприиимать тона, число колебаний которых превышает или не достигает некоторой определенной величины, так же точно и нормальный глаз ие может обнаружить окрашенные лучи за красиым (инфракрасные лучи) и за фиолетовым (ультрафиолетовые лучи) видимыми концами спектра. Нормальный глаз различает 7 ньютоновских осиовиых цветов (во всяком случае не меиее шести). Все вышесказаиное отиосится к спектру диевного (солнечиого) света; в дальиейшем мы будем заииматься только этим светом.

Если щель, сквозь которую падает свет, достаточно узка, то видно миожество тоиких чериых линий, идущих поперек спектра, параллельиых направлеиию щели и появляющихся в том же самом порядке в каждом солнечном спектре. Наиболее заметиые из них обозиачены А. Фраунгофером большими и малыми буквами латииского алфавита. На рис. 179 обозначеиы важнейшие из этих линий. Таким образом каждый цвет спектра определяется тем, что его положение в спектре указывается относительио смежиой фрауигоферовой лииии; так иапример выражение желто-зелеиый— очеиь неопределеиное; если же мы скажем $D\frac{1}{4}E$, то это будет совершеиио точио выражено, так как озиачает, что данный цвет расположен в первой четверти расстояиия между фраунгоферовыми лиииями $D$ и $E$ солиечиого спектра.

Каждому цвету отвечает определеииое число колебаний, другими словами, определениая световая волиа с определениой частотой и определеииой амплитудой. Если представить себе волны в виде синусоиды, то стаиет понятиым, что длииой волиы называется расстояиие между двумя максимумами или между двумя одииаковым образом расположеииыми точками. Для измереиия длии волн пользуются различиыми единицами. К. Аигстрэм в качестве едииицы измереиия примеиил одиу десятимиллиоиную часть миллиметра — это и есть так изываемая едииица Аигстрэма (Å). В иижеследующей таблице указаны длины волн, соответствующие восприиимаемым глазом основным участкам спектра:

| | |
|---|---|
| **Сине-фиолетовый** | — 4000 — 5000Å |
| **Зеленый** | — 5000 — 6000Å |
| **Красно-оранжевый** | — 6000 — 7000Å |

Указанные в этой таблице спектральные области (длин волн) соответствуют основным ощущениям глаза и будут иметь первостепенное значение в нашем дальнейшем изложении.
Уже беглое ознакомление со спектром показывает, что его различные цвета (области) имеют для глаза различную яркость. Следующая таблица показывает относительные яркости отдельных цветов и присущие им «количества света», причем количество всего света спектра принято за 100.

| Цвет | Относит. яркость | Количество света |
|---|---|---|
| Красный | 8 | 9,1 |
| Оранжевый | 76 | 14,7 |
| Желтый и желто-зеленый | 100 | 39,6 |
| Зеленый и зелено-голубой | 64 | 30,3 |
| Синий и индиго | 12 | 3,8 |
| Сине-фиолетовый | 7 | 1,3 |
| Фиолетовый | 4 | 1,2 |

Актиничность отдельных цветов (окрашенных лучей) спектра, т. е. их способность действовать на светочувствительный слой обыкновенной фотографической пластинки и вызывать в ней фотохимические превращения, тоже очень различна. Для того чтобы на обыкновенной фотографической пластинке при действии отдельных цветов спектра вызвать в течение определенного времени такое же почернение, требуется при прочих равных условиях: при пользовании зеленым светом 4-кратное, при пользовании желтыми — 36-кратное, при пользовании оранжевым — 120-кратное, а при пользовании красным светом 1 600-кратное время освещения по сравнению с белым светом. Развитию цветной фотографии, т. е. выработке практически пригодного метода получения цветных фотографических изображений, очень мешало то обстоятельство, что на нормальный человеческий глаз и на обыкновенную фотографическую пластинку окрашенный свет (его цветные лучи) действуют совершенно различно. Если бы это затруднение не удалось преодолеть, мы и до сегодняшнего дня не располагали бы практически пригодным методом цветной фотографии.
Указанные трудности преодолеваются двумя способами. Установлено, что эмульсия обыкновенной фотографической пластинки может быть сделана более чувствительной в желтой и зеленой области спектра, если к эмульсии добавить определенные красители. Пластинки с приготовленной таким способом эмульсией называются ортохроматическими, или изохроматическими. В дальнейшем оказалось необходимым очувствить эмуль-

сию и к красной области спектра: так возникла панхроматическая пластинка, пользование которой в цветной фотографии ничем не заменимо, какой бы метод ее ни был применен. К сожалению панхроматическая пластинка обладает неприятным свойством быть непропорционально сильно чувствительной к синей, фиолетовой и ультрафиолетовой областям спектра, т. е. как раз к тем лучам, которые кажутся глазу наименее яркими или же вовсе не воспринимаются им.

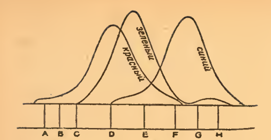
В практике цветной фотографии пользуются цветными светофильтрами, сквозь которые свет должен пройти до того, как он попадет на пластинку. В числе прочих фильтров применяется желтый фильтр, поглощающий определенные лучи фиолетового конца спектра или ослабляющий их в известной степени и пропускающий оптически более яркие лучи средней части спектра и его красного конца.

Простая комбинация определенного фильтра с любой пластинкой конечно совершенно не устраивает; необходимо, чтобы они соответствовали друг другу. Не всякие панхроматические пластинки одинаково чувствительны к отдельным участкам спектра и не все светофильтры, кажущиеся глазу одинаково окрашенными, поглощают одни и те же лучи.

Только основываясь на тщательном спектроскопическом исследовании, можно так подобрать фильтр, чтобы при комбинации с панхроматической пластинкой возможна была безошибочная, правильная в смысле яркости передача цветов какого-нибудь определенного оригинала. Следует также позаботиться о том, чтобы при пользовании для освещения снимаемого об'екта различными искусственными источниками света (дуговой свет, лампы с металлической нитью, газокалильный свет), в числе прочих условий применялись различные соответствующие фильтры, иначе цель не будет достигнута.

Вернемся однако к проблеме суб'ективного цветового ощущения. Томас Юнг в 1807 г. выдвинул следующую теорию: в сетчатке глаза имеется три различные рода нервных волокон, которые могут возбуждаться падающими на них лучами таким образом, что в мозгу возникают цветовые ощущения красного, зеленого и синего или (по другому варианту этой теории) красно-оранжевого, зеленого и сине-фиолетового. Теорию Юнга называют обычно теорией Юнгах — Гельмгольца, так как Гельмгольц своими исследованиями значительно способствовал развитию этой теории Максвелл построил кривые, которые доказывают, в какой мере отдельные спектральные цвета дают названные три основных ощущения; оналогичные кривые получены также В. Абнеем в результате большого числа опытов (рис. 180).

Кривая с пометкой «красный», медленно поднимающаяся приблизительно начиная от линии *A* спектра, достигает своей наивысшей точки около *C*¾*D* и затем спадает к *F*. Это есть так называемая «кривая красной чувствительности», которая указывает, какая часть спектра и в какой степени вызывает цветовое ощущение красного. Средняя кривая есть «кривая зеленой чувствительности», а крайняя правая — «кривая синей чувствительности».




**180.** Призменный солнечный спектр и кривые основных ощущений по В. Абнею

Всякое цветовое ощущение надо рассматривать как суммарное действие названных трех основных ощущений, причем последние участвуют в ощущении совместно, в различных комбинациях и с различной интенсивностью. Ясно, что число возможных комбинаций бесконечно велико. Названные три основные цвета, а именно: красно-оранжевый, зеленый, сине-фиолетовый, во всех способах трехцветной фотографии играют существенную роль. Фильтры, применяющиеся в этих способах, имеют указанные цвета. В дальнейшем мы покажем, что цветные оттенки получаемых в конечном итоге цветных изображений обязаны своим происхождением более или менее сильному воздействию названных трех основных цветов.

Приведенная теория цветового ощущения и наше действительное суб'ективное цветовое ощущение очень хорошо совпадают. Апельсин, рассматриваемый на дневном свету, дает нам ощущение оранжевого цвета, так как он поглощает или ослабляет определенные лучи спектра и отражает ряд других лучей, которые, взятые вместе, попадая в наш глаз, дают ощущение оранжевого. При получении цветной фотограммы этого оранжевого мы заботимся о том, чтобы при рассматривании его к нам в глаз попадали *такие же самые* лучи. Кусок рубинового стекла кажется в проходящем свете красным, так как сквозь него могут пройти только лучи этого цвета, которые в целом (при посредстве глаза) вызывают в мозгу ощущение красного. На фотографическом снимке тот же цвет достигается тем, что всем некрасным лучам закрывается доступ к слою (см. ниже).

Теперь разберемся в том, что должно произойти, если мы пропустим свет сквозь различно окрашенные среды на белый экран. Такой случай имеет место в проекционном аппарате с тремя об'ективами (по Ф. Е. Айвсу). Когда три об'ектива этого аппарата находятся в исходном положении, то три проектируемые кружка изображения расположены рядом; посредством простого механического устройства эти три об'ектива можно так взаимно расположить, что кружки изображения, лежащие снаружи, накладываются на средний кружок (либо оба одновременно либо последовательно). Перед каждым об'ективом имеется ярко окрашенное стекло; цвета стекол будем считать (приблизительно) красным, зеленым и синим. Ярко окрашенные кружки изображений сперва

спроектируем рядом, а затем один на другой. При проектировании их друг на друга получается один кружок изображения, кажущийся почти белым.

На первый взгляд должно показаться странным, что виден белый кружок, в то время как на экран не проектируется белого света — ведь мы предупредили, что перед проекционными об'ективами стоят окрашенные стекла (красное, зеленое и синее). Об'яснить, почему кружок кажется белым, очень легко. А именно: легко можно себе представить, что весь пучок лучей, дающий белый свет, был разделен на три меньших пучка, из коих один содержит все лучи, вызывающие в мозгу ощущение красного, другой — все лучи, вызывающие ощущение зеленого, и третий — все лучи, вызывающие ощущение синего. Когда лучи всех трех пучков падают на один и тот же участок поверхности проекционного экрана, они совместно должны оказать конечно такое же действие, как и весь пучок лучей: вместе они дают белый свет.

С помощью описанных проекционных об'ективов и поставленных перед ними светофильтров можно при определенных условиях получить различные эфекты в зависимости от того, какие окрашенные пучки лучей будут совместно проектироваться.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Красный | + | зеленый | + | синий | = | белому |
| Красный | | | | | = | красному |
| Красный | | | + | синий | = | пурпуровому |
| Красный | + | зеленый | | | = | желтому |
| | | зеленый | | | = | зеленому |
| | | зеленый | + | синий | = | сине-зеленому |
| | | | | синий | = | синему |
| Отсутствие света | | | | | = | черному |

Как показано в вышеприводимой таблице, отдельные цвета при совместном проектировании могут целиком отсутствовать, но можно исключать их и частично, применяя «ослабляющие» фильтры соответствующей плотности: таким путем при совместном проектировании можно получать всевозможные цвета и оттенки.

Описываемый ниже метод трехцветной фотографии был предложен Ф. Е. Айвсом в Филадельфии. Названный ученый сперва приготовил три отдельных негатива со снимаемого об'екта под тремя цветными фильтрами (красным, зеленым и синим), кривые прозрачности (пропускания) которых отвечали кривым основного ощущения глаза, построенным Максвеллом. Три негатива приготовлялись последовательно один за другим на смежных участках одной и той же пластинки. Имеются специальные камеры для цветной фотографии, которые, будучи снабжены зеркалами или призмами, позволяют одновременно получить три негатива на одной или на трех пластинках. При пользовании с'емочным аппа-

ратом Айвса приходится делать три следующие одна за другой экспозиции, продолжительности которых зависят каждый раз от окраски фильтра. Аппараты для одновременной с'емки всех трех негативов снабжены соответствующе подобранными фильтрами. Устройство их сложно, работать с ними далеко не так просто и стоят они дорого.

Негатив, снятый под красным фильтром, дает ту же градацию яркостей, что и отражаемые фотографируемым об'ектом лучи, в той мере, в какой они играют роль в кривой красной чувствительности Максвелла. Отпечатанный с этого негатива диапозитив, покрытый красным фильтром, участвовавшим в с'емке, и спроектированный на экране проекционным аппаратом, будет правильно передавать яркости красных частей снятого об'екта. Аналогичные результаты получатся с зеленым и синим диапозитивами (отпечатанными с зеленого и синего негатива). Если теперь спроектировать друг на друга все три диапозитива (с соответствующими фильтрами впереди), получится цветное изображение об'екта со всей присущей ему градацией яркостей и гаммой цветных оттенков.

Позже Ф. Е. Айвс предложил с'емочный аппарат, с помощью которого отдельные негативы («цветные оттиски») получаются, как в стереоскопической камере; для рассматривания диапозитивов, сделанных с этих негативов, применялся особый прибор («Kromskop»), сконструированный наподобие стереоскопа. Получившиеся с помощью описанных аппаратов изображения были очень красивы и правильно передавали цвета. Очень жаль только, что этот способ страдает тем недостатком, что в нем необходимы специального устройства аппараты для с'емки и для рассматривания. Недостатком является также усложнение работы вследствие необходимости приготовления трех безукоризненно правильных негативов и стольких же позитивов.

Другой способ трехцветной фотографии (тоже с тремя отдельными негативами) предложен Е. Зенгер-Шефердом. По этому способу с трех негативов (снятых под разными фильтрами) приготовляется один диапозитив, который можно проектировать с помощью обычного проекционного аппарата. Этот метод мы опишем более подробно, так как он дает отличные результаты.

Когда отдельные негативы готовы, с полученного под красным фильтром негатива делается черно-белый диапозитив на стекле. Этот диапозитив купанием в соответствующем растворе красителя окрашивается в сине-зеленый цвет. Затем с негативов, полученных под зеленым и сине-фиолетовым фильтрами, на куске специальной целлюлоидной пленки (рядом и одновременно) делаются контактные копии, после того как эта пленка покрыта желатиной и сенсибилизирована раствором бихромата калия; копируют сквозь целлюлоид. Изображение, получающееся на эмульсионной стороне целлюлоида, выглядит как платиновая копия перед проявлением или как копия на хромированной желатине для бромомасляной печати. После проявления в теплой воде получается позитивное желатиновое рельефное изображение большой механической прочности. Пленка промывается, после чего она го-

това к окраске. Кусок целлюлоидной пленки разрезается, и с полученными двумя отдельными отпечатками поступают следующим образом: позитив с зеленого негатива окрашивается в розовый цвет, а позитив с сине-фиолетового негатива — в желтый. Когда окрашенные копии высохнут, их накладывают на ранее приготовленный сине-зеленый стеклянный диапозитив. Все три отпечатка совмещают, прокладывают двумя тонкими покровными стеклами и склеивают при помощи гуммированных полосок бумаги. Гораздо лучше склеивать пленки и стеклянный диапозитив канадским бальзамом.

По поводу окраски диапозитивов по способу Е. Зенгер-Шеферда можно добавить следующее: в способе Айвса проектируемые (сквозь фильтр) позитивы окрашены так же, как и светофильтры, под некоторыми сделаны негативы, а в способе Зенгер-Шеферда цвет позитива по отношению к цвету фильтра соответствующего негатива является д о п о л н и т е л ь н ы м. Постараемся это обосновать.

В способе Айвса, как уже было показано, окрашенный свет присоединяется к свету другой окраски; все лучи, взятые вместе, дают впечатление белого света. Если бы мы вместо трех проекционных об'ективов взяли только один и дали свету проходить сквозь три фильтра, поставленные один за другим, то до проекционного экрана не дошло бы никакого света. Лучи света, пропущенные каким-нибудь одним фильтром, были бы поглощены другим. Аналогичным путем при наложении друг на друга красного, зеленого и синего пигмента получается черный цвет. В первом случае, в котором каждый фильтр добавляет лучи определенной окраски к общему впечатлению, мы имеем перед собой а д д и т и в н ы й цветовой синтез, а во втором, когда один фильтр поглощает лучи, пропущенные другим фильтром, пред нами с у б т р а к т и в н ы й цветовой синтез.

Рассмотрим сперва негатив, полученный под красным фильтром. Плотные места в негативе соответствуют тем местам пластинки, почернение которых было вызвано действием красных лучей, дошедших до пластинки от об'екта. На диапозитиве, сделанном с этого негатива, красные места оригинала кажутся более или менее прозрачными. Если пропустить белый свет через этот диапозитив с наложенным на него красным фильтром, то при проектировании такого изображения на экран мы увидим красные участки оригинала. Но по способу Зенгер-Шеферда с такого негатива приготовляется рельефное изображение на хромированной желатине, выпуклые места которой обязаны своим происхождением прозрачным местам негатива, т. е. тем именно, на которые красные лучи не действовали, — потому-то эти места и окрашиваются в сине-зеленый цвет.

Такое рассуждение приложимо ко всем субтрактивным методам трехцветной фотографии, равно как и к способам печати с поглощением и переносом красок, — в таком виде, как они применялись и применяются Е. Зенгер-Шефердом и другими. С трех негативов приготовляются позитивы на хромированной желатине по способу, описанному выше. Позитив с негатива, полученного под

зеленым фильтром, кладут в раствор розовой краски. Участки слоя разной толщины в этом растворе впитывают различные количества раствора краски. Если теперь прижать окрашенную пластинку к влажной желатинированной бумаге, то последняя по истечении нескольких минут воспримет в соответствующих местах красную краску. Отпечаток на хромированной желатине с негатива, полученного под синим фильтром, окрашивается в желтый цвет и затем со всей тщательностью, т. е. придерживаясь определенных контрольных марок, накладывается на красный отпечаток на бумаге и оставляется на нем до тех пор, пока бумага воспримет желтую краску. И наконец позитив с негатива, полученного под красным фильтром, окрашивается в растворе сине-зеленой краски и прижимается к желто-красному отпечатку. (Сюда же относится и пинатипный способ Л. Дидье.)

Цветные фотограммы можно получить и иными способами, например путем накладывания друг на друга пигментных слоев, перенесенных со стекла или бумаги путем использования гуммипечати, пользуясь вирированными бромосеребряными отпечатками или цветными бромосеребряными пигметными слоями по способу Редекса (один из видов озобромной печати). Приготовление цветных фотографических отпечатков на бумаге требует большой тщательности и большой затраты времени; несмотря на это, получаемые результаты не вполне удовлетворительны, а именно: краски выглядят тускло, им нехватает прозрачности и блеска. Это происходит повидимому потому, что падающий на отпечаток свет, прежде чем отразиться от бумажной подложки, должен пройти сквозь слой цветного пигмента или краски. Таким образом бо́льшая часть света поглощается. Замена бумаги блестящими металлическими поверхностями в качестве подложки для слоя в целях повышения блеска отпечатка успеха не имела. Непрерывно предлагаются новые способы получения цветных фотографических отпечатков на бумаге (причем все время имеются в виду видоизменения или усовершенствования основного способа). Все они представляют интерес, так как бумажные отпечатки, получаемые этими способами, имеют чисто «фотографический» характер и не обнаруживают растровой структуры, являющейся общим недостатком всех снимков, полученных на растровых пластинках.

Заканчивая, можно сказать, что до сих пор нет фотографического способа трехцветной печати на бумаге, дающего любое количество безукоризненных цветных, совершенно одинаковых копий. Поэтому при современном положении вещей мы пока вынуждены считать изображения на пластинках с цветным растром наилучшими.

До того как приступить к более подробному описанию пластинок с цветным растром, укажем на некоторые основные факты, касающиеся цветового восприятия и стоящие в тесной связи с теорией пластинки с цветным растром. Разбор этих фактов поможет нам понять происхождение различных ошибок, способы их устранения или предотвращения и найти пути, с помощью которых на пластинках с цветным растром могут получаться действительно удовлетворительные снимки. На растровых пластинках, вообще

говоря, можно получать безукоризненные снимки, передающие все оттенки цветов, света и тени оригинала.

При рассматривании какого-нибудь сложного цвета в соответствующей степени возбуждаются упомянутые нами выше три группы нервных волокон сетчатой оболочки глаза. Как происходит это возбуждение, можно усмотреть из кривых цветового восприятия Абнея. Если одновременно возбуждаются нервные волокна, чувствительные к красному и зеленому, то в зависимости от количественного соотношения этих возбуждений мы ощущаем цвета от красного, оранжевого и желтого до зеленого. При одновременном возбуждении нервных волокон, чувствительных к зеленому и синему, глаз ощущает цвета от зеленого до синего. Одновременное возбуждение всех трех групп нервных волокон ведет к ощущению смешанного цвета, и при частных возбуждениях, стоящих во взаимном, совершенно определенном, количественном соотношении, получается ощущение белого.

Цвет характеризуется тремя элементами: оттенком, насыщенностью и яркостью. Когда мы рассматриваем например красный участок спектра и направляем на него белый свет, то насыщенность красного уменьшается. Когда мы уменьшаем яркость охваченного глазом спектрального участка добавлением черного, появляются коричневые до терракотовых тона. Аналогичные соотношения получаются и в других участках спектра, когда мы поступаем таким же образом.

Черный — это есть отрицание в понятии о краске, т. е. обозначение отсутствия светового восприятия. Серый — это белый, яркость которого снижена добавлением черного. Черные и серые тона в фотограмме передаются различной плотностью серебряного осадка.

Получившие известность автохромные пластинки изготовляются фирмой Люмьер и Жугля в Лионе; пластинки с цветным растром мы опишем несколько подробнее. (Фирма «Агфа» тоже выпустила пластинки с цветным растром, так называемые цветные пластинки «Агфа», родственные автохромной пластинке.) Оранжево-красные, зеленые и сине-фиолетовые зерна картофельного крахмала одинаковой величины тщательно смешиваются в следующей пропорции: оранжево-красных—3 весовые части, зеленых — 4 и сине-фиолетовых — 2. Диаметр зерна приблизительно равен 0,01 *мм*. На пластинку 13 × 18 *см* приходится около 200 млн. таких зерен. Окрашенные крахмальные зернышки просеиваются из сита на стеклянную пластинку, смазанную соответствующе подобранным клеем и прикатываются к ней. При этом важно, чтобы отдельные зернышки не накладывались друг на друга и чтобы не образовывались скопления одинаково окрашенных зернышек. Небольшие промежутки между зернами заполняются непрозрачным веществом. После этого слой крахмальных зерен покрывается лаком и затем поливается панхроматической светочувствительной эмульсией.

Автохромная пластинка поворачивается к об'ективу стеклянной стороной (стекло должно быть тщательно вычищено); лучи света, прежде чем упасть на фотографический слой, должны таким обра-

зом пройти через слои крахмальных зерен. Так как автохромная пластинка закладывается в кассету стеклянной стороной к заслонке, для защиты светочувствительного слоя в кассету вкладывается кусок тонкого черного картона. Матовое стекло с'емочного аппарата тоже должно быть обернуто, т. е. матовой поверхностью оно должно быть обращено к наблюдателю

При с'емке на автохромных пластинках применяется желтый светофильтр, подобранный к этим пластинкам. Такой фильтр (с точки зрения геометрической оптики — это плоскопараллельная пластинка) обусловливает некоторое, хотя и небольшое, смещение плоскости изображения, если наводка была сделана без фильтра. По этой причине такие снимки нельзя делать с помощью так называемой камеры с постоянным фокусом или же камеры со шкалой для наводки по расстоянию. Особенно это важно в тех случаях, когда фильтр ставится позади об'ектива. При пользовании камерой, в которой наводка может контролироваться оператором по матовому стеклу, совершенно безразлично, где помещен фильтр — позади или впереди об'ектива.

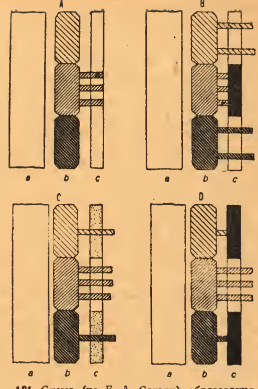
Вследствие присутствия растра из крахмальных зерен и неизбежности пользования желтым светофильтром чувствительность автохромных пластинок очень мала; по системе Хертера—Дриффильда она равна 2, по исчислению Ваткинса — 3 и по Винну — $\frac{f}{14}$.

Указанные значения чувствительности нельзя рассматривать как какие-то абсолютные величины, так как они сильно меняются в зависимости от характера применяемого источника света. Пользование экспонометром при с'емке на автохромных пластинках должно оказать хорошие услуги. При определении необходимого времени освещения как раз при снимках этого рода очень существенную роль играет опытность оператора.

Проявлять автохромную пластинку можно разными способами, но большей частью проявляют в метолгидрохиноновом проявителе в полной темноте (или при свете специальной лабораторной лампы), контролируя ход проявления или на просвет, или ведут проявление по времени. Сперва получается негатив, на котором, как мы покажем ниже, можно видеть изображение об'екта в д о п о л н и т е л ь н ы х цветах.

После растворения негативного изображения в кислом растворе перманганата пластинка вторично проявляется при затененном дневном свете. Для второго проявления необходим проявитель, дающий изображения в чистых (черных и серых) тонах; раствор метол-гидрохинона, служивший для первого проявления, вполне пригоден для второго проявления. По окончании этой операции получается позитивное изображение, состоящее из серебра, не восстановившегося при проявлении негатива. Это позитивное изображение имеет правильную расцветку. Иногда бывает необходимо усилить это изображение. В таких случаях пластинку после второго проявления кладут в фиксаж. Во всех случаях снимок промывается, сушится и затем лакируется. Некоторые фотографы придерживаются взгляда, что следует избегать усиления цвет-

ного растрового снимка. Вместо усиления они дают более продолжительную экспозицию и прерывают проявление в тот момент, когда изображение еще „прозрачно", но все детали уже обладают достаточной градацией. В этом случае в снимке остается достаточное количество невосстановленного серебра и при втором проявлении получается сильное изображение, не требующее никакого усиления.



**181.** Схема (по Е. А. Сальту) образования изображения на пластинке с цветным растром

Постараемся с помощью рис. 181 (по идее Е. А. Сальта) пояснить, как образуется цветной снимок на пластинке с цветным растром. Буквой *a* на рис. 181 помечена стеклянная пластинка, *b* — слой крахмальных зерен, схематически изображенный в виде трех различно окрашенных зерен (красного, зеленого и сине-фиолетового, на рисунке — сверху, посредине и внизу), *c* панхроматический светочувствительный слой. Свет падает на пластинку слева, после того, как он до этого прошел об'ектив и фильтр, помещенный перед об'ективом или позади него. Ради простоты допустим, что снимаемый об'ектив представляет собой равномерно освещенную поверхность, цвет которой в точности соответствует цвету зеленого крахмального зерна.

На рис. 181*a* мы видим, что светочувствительного слоя достигает только зеленый свет, пройдя зеленое крахмальное зерно. Рис. *b* изображает состояние автохромной пластинки после проявления. Мы видим, что позади зеленого крахмального зерна светочувствительный слой почернел. Если рассматривать негатив на просвет, то зеленого не видно. Свет может проходить только сквозь красное и синее крахмальные зерна. Оба эти цвета дают беловатый зеленый. Кроме того лучи ослабляются, проходя через оставшуюся неизменной эмульсию. На рис. 181 это обозначено тем, что в указанных местах из эмульсионного слоя выходят не по три, а только по два луча. На рис. *c* изображен «обращенный» негатив. Металлическое серебро позади зеленого крахмального зерна растворено, зеленые лучи света теперь могут проходить через прозрачный эмульсионный слой. Однако серебряный осадок позади красного и синего крахмальных зерен не вполне непро-

зрачен, и сквозь него свет тоже может отчасти проходить. На нашем рисунке это обозначено тем, что в этих местах выходит не по три луча, а только по одному. В результате этого обстоятельства «характер» зеленого цвета кажется видоизмененным: он беловатый. На рис. *d* мы видим результаты усиления: красные и синие лучи поглощаются серебряным осадком, ставшим теперь уже вполне плотным, — сквозь эмульсионный слой проходят только зеленые лучи и об'ект виден в его натуральном цвете.

Если бы в зеленом об'екте имелась градация яркости, она была бы видна и в позитивном растровом снимке: вместо того чтобы эмульсионный слой был совершенно прозрачен позади каждого зеленого крахмального зерна в отдельных местах имеются серебряные осадки с большей или меньшей плотностью, т. е., другими словами, более или менее непрозрачные для света. Если цвет снимаемого об'екта отличается своим оттенком от цвета зеленого крахмального зерна, то и цвет его растрового снимка будет соответственно видоизменен. Это видоизменение зависит от того, что кроме зеленых лучей на автохромную пластинку действует определенное количество красных или синих лучей или же и красных и синих.

При передаче других цветов или оттенков приведенное рассуждение остается в силе. От градации цветного растрового изображения зависит, как будут переданы с помощью растровой пластинки тонкие переходы в тонах оригинала. Так как позади каждого отдельного крахмального зерна возникает совершенно определенное фотографическое почернение, то последующее совпадение позитивного изображения с растром из крахмальных зерен излишне; ведь светочувствительный слой и растр тесно связаны между собой.

Поразительно, что вообще возможна передача автохромной пластинкой чисто белого цвета, например белого льняного воротничка. Так как растр автохромной пластинки (как и прочих цветных растровых пластинок) сам по себе не белый, а окрашен в какой-нибудь цвет, то наличие белого в снимке не может быть об'яснено только тем, что белый свет составлен из лучей, прошедших все три типа растровых зерен (красных, зеленых, синих). Г. Джонсон вероятно прав в своем об'яснении этого явления, когда он утверждает следующее: в тех местах слоя, где изображается белый предмет, имеется множество серебряных частиц, «рассеивающих» падающий свет; благодаря этому рассеянию и исчезает упомянутая выше окраска.

Многие утверждают, что пластинка с цветным растром страдает тем недостатком, что с нее нельзя делать копий, т. е. что фотографируемый об'ект надо снимать столько же раз, сколько желательно иметь отпечатков. Это утверждение неправильно. С хороших цветных растровых снимков можно делать копии на пластинках с цветным растром, пользуясь при этом специально сконструированным братьями Люмьер копировальным ящиком. В качестве источника света при этом пользуются солнечным светом или магнием. Имеется также следующая возможность: отфиксировать автохромную пластинку после первого проявления и поль-

зоваться ею как негативом, с которого прямо печатать позитивы (с однократным проявлением). Действительно А. и Л. Люмьерам и другим лицам удавалось получать на пластинках с цветным растром отличные копии с автохромных снимков.

Наиболее простая по структуре цветного растра пластинка была предложена Джоли (Дублин) в 1894 г. Он изготовил свой растр из соприкасающихся параллельных полос, которые были попеременно окрашены в оранжевый, сине-зеленый и синий цвета; на 1 англ. дюйм (около 26 *мм*) приходилось до 150 полос. Панхроматическая пластинка приводилась в контакт с этим растром и освещалась. С полученного таким путем негатива Джоли делал позитив и приводил последний в контакт с другим растром, тождественным с'емочному. Цветное изображение возникало на таких пластинках на основании тех же принципов, которые схематически пояснены на рис. 181 применительно к обычным пластинкам с цветным растром. Дж. Мак Доног применял такой же растр, как и Джоли, но с 420 полосами на 1 англ. дюйм (около 26 *мм*). Пластинка со слишком мелким линейным растром может давать явления дифракции. Как известно, возникают очень красивые дифракционные спектры, когда свет, пройдя узкую щель, попадает на линейный растр (решетку). Такие решеточные спектры отличаются от призменных тем, что в них цвета расположены пропорционально разности их длин волн, в то время как в призменных спектрах красные (длинноволновые) лучи оказываются сжатыми, а коротковолновые (фиолетовые) растянутыми. При пользовании пластинкой с линейным растром в некоторых случаях возможно возникновение дифракционных спектров, хотя и слабых, но все же мешающих.

В 1906 г. Фенлей запатентовал так называемую тцемс-пластинку. Растр этой пластинки состоит из маленьких, тесно прилегающих друг к другу зеленых и красных кружочков с синими промежутками между ними. Эта пластинка в дальнейшем развилась в известную пластинку «Педжет» с растром из квадратиков (вместо кружков); на 1 кв. дюйм (6,25 *см*$^2$) приходится 90 000 таких элементов. Этот растр или прямо покрывается светочувствительным слоем, как в автохромной пластинке, т. е. тесно связан со слоем, или только приводится в контакт с ним, как у Джоли. Работа по последнему методу оказалась более удобной.

Растр для с'емки и растр для рассматривания должны быть тождественны друг другу. По форме растровые элементы должны вполне совмещаться, а цветом несколько отличаться, чтобы нельзя было их смешать. Пластинка «Педжет» обладает чувствительностью (с учетом фильтра — перед об'ективом или позади него, а также цветного растра) приблизительно в 15° Ваткинса, или *f* 24 по Винну, т. е. она значительно чувствительнее автохромной пластинки; подходящие об'екты при хорошем освещении можно фотографировать на таких пластинках при довольно короткой экспозиции.

С'емочный растр и светочувствительный слой в момент с'емки находятся в самом тесном контакте; с полученных негативов можно сделать копии, увеличения, диапозитивы; имеющаяся в изобра-

жении структура растра не мешает. Для получения снимка в натуральных цветах с негатива-оригинала делается диапозитив, и последний складывается с растром для рассматривания так, чтобы получилось полное «совпадение». Само собой понятно, что приготовляемое число позитивов и растров для рассматривания должно быть в точности равно требуемому числу копий с пластинки «Педжет». Возникновение цветов на такой пластинке основано на тех же принципах, которые пояснены на рис. 181.

Удачный снимок на пластинке «Педжет» будет в равной мере хорош и как цветной транспарант и как черно-белый снимок (когда он без цветного растра) и как проекционный диапозитив. Цветное изображение видно на пластинке «Педжет» только когда она соприкасается с растром для рассматривания, совмещенным с нею «точка в точку». Понятно, надо чтобы обе пластинки продолжали оставаться в этом же положении, иначе цветное изображение исчезнет.

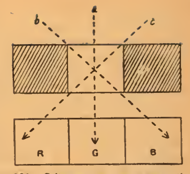
Когда пластинки соединяются с помощью гуммированных полосок, достаточно бывает самого незначительного смещения их относительно друг другу, чтобы цветное изображение исчезло. На основании многолетнего опыта автор рекомендует следующие приемы, позволяющие правильно совмещать пластинки и удерживать их в таком положении.

Сначала на каждый угол позитива (диапозитива) наносят капельку рыбьего клея, величиной с булавочную головку. Затем накладывается растр, и обе пластинки держат против яркого света. При прижимании пластинок друг к другу капельки клея растекаются и ведут себя наподобие смазки, поэтому пластинки можно легко сдвигать относительно друг друга. В проходящем свете пластинки сначала напоминают рисунок мелкогофрированной ткани. При взаимном смещении пластинок этот рисунок сначала становится грубей, но постепенно расплывается и совершенно исчезает в тот момент, когда цветные элементы растра в точности совпадут с соответствующими точками позитива. Двигая пластинками, можно точно определить, при каком положении цвета снимка кажутся правильными. Рассматривать пластинку надо по нормали; когда найдено взаимное правильное положение пластинок, их сдавливают сильными зажимами и откладывают в сторону. После того как клей засохнет, не приходится опасаться смещения пластинок. При пользовании полосками бумаги для склеивания краев пластинок часто по прошествии некоторого времени (из-за деформации бумаги) между позитивом и растром образуются промежутки. Во избежание этого края диапозитива надо смазывать соответствующим лаком, а также заполнять им по краям промежуток между пластинками.

Против пользования растровым диапозитивом и отдельной от него растровой пластинкой говорит то обстоятельство, что при таком устройстве могут возникнуть параллактические ошибки. Параллакс дает о себе знать тем, что один об'ект кажется сместившимся относительно другого, как только меняется направление луча зрения на один или другой об'ект. Когда мы смотрим строго по нормали на определенную точку растровой пластинки, только

тогда мы видим то, что находится отвесно под ней; в остальных же случаях видно то, что лежит вбок, позади нее.

Постараемся пояснить наше утверждение схематическим рисунком (рис. 182). Верхние три поля представляют собой части позитива, причем два внешние поля непрозрачны, а среднее прозрачно. Этот позитив находится в свободном контакте с цветным растром, а именно: над тремя полями позитива лежат красное, зеленое и синее зерна растра. Если свет идет по направлению стрелки *a*, он проходит прозрачную часть позитива и просвечивает зеленое зерно растра; если же свет идет сквозь позитив и растровую пластинку по направлению стрелок *b* или *c*, то просвеченным оказывается синее или красное зерно.




**182.** Об'яснение „параллакса“ при рассматривании снимка с цветным растром, у которого диапозитив и растровая пластинка самостоятельны

Если пластинку «Педжет» (с отдельным растром) рассматривать не по нормали, а под любым другим углом, то цвета снимка искажаются. Конечно всю поверхность пластинки невозможно рассматривать из одной точки так, чтобы направление луча зрения все время оставалось нормальным к плоскости пластинки. По этой причине только ограниченный участок снимка, сделанного на пластинке «Педжет», выглядит хорошо. На пластинке с цветным растром по типу автохромной пластинки, у которой растр и эмульсионный слой находятся в теснейшем контакте, описанное явление не наблюдается.

Пластинка с цветным растром типа «Педжет» проявляется так же, как и черно-белый негатив на панхроматической пластинке, только проявление останавливается раньше обычного. Для облегчения контроля за ходом проявления пластинку десенсибилизируют: для этого ее до проявления купают в десенсибилизирующем растворе (пинакриптола) в течение нескольких минут. Такая предварительная обработка позволяет проявлять пластинку при сравнительно ярком свете, при котором без десенсибилизации она безнадежно завуалировалась бы. Возникающие вследствие десенсибилизации пятна исчезают в кислой фиксажной ванне и при последующей промывке пластинки. При проявлении автохромной пластинки не следует прибегать к десенсибилизации, так как здесь продолжительное промывание может повредить и потому нежелательно.

Имеется много типов пластинок с цветным растром, отличающихся друг от друга рисунком растра и тем, что слой растра и светочувствительный слой тесно связаны между собой, или находятся отдельно друг от друга. Из всех появившихся образцов наибольшее применение получили автохромная пластинка Люмьер—Жугля, цветная пластинка «Агфа» и цветная растровая пластинка «Педжет». Названные сорта превосходны. Каждый из них имеет

свои особенности, т. е. обладает определенными достоинствами и страдает определенными недостатками. Мы воздерживаемся от изложения специальных указаний о работе с ними, так как подробные указания на этот счет приложены в виде наставления к каждой коробке пластинок. Этих указаний следует точно придерживаться и отклоняться от них только при наличии достаточного личного опыта в работе с ними.

В упомянутых наставлениях содержатся указания и на наиболее часто встречающиеся ошибки при работе на данных пластинках, причины этих ошибок и способы их предотвращения. Мы остановимся только на нескольких моментах, которые часто упускаются и на которых поэтому должно быть сосредоточено особое внимание.

1. На пластинку с цветным растром должен действовать только свет, предварительно прошедший сквозь светофильтр, приспособленный к данному сорту пластинок и к данному источнику света. Достаточно самое незначительное количество непрофильтрованного света, чтобы сообщить снимку голубой или фиолетовый оттенок.

2. Должно быть обеспечено, чтобы пластинки достигали только лучи, действительно необходимые для образования изображения. Цветные лучи, отражаемые мехом камеры вблизи пластинки, могут испортить изображение.

3. Перед экспозицией необходимо удостовериться в том, что снимаемый об'ект правильно освещен, т. е. отражает достаточно света.

Пластинки с цветным растром можно освещать также и при свете вспышки (при пользовании таким источником света нужно брать специальный фильтр с более интенсивной желто-зеленой окраской); для этих целей выпущены специальные смеси. А. и Л. Люмьеры и А. Зееветц рекомендуют вспышку, содержащую перхлорат калия, вместо обычного содержания в вспышке хлорноватокислого калия. Вспышка с перхлоратом калия (хлорнокислым калием) содержит больше анктиничных лучей и кроме того надежнее в употреблении. Эта смесь состоит из 2 весовых частей мелко просеянного магния в порошке и 1 весовой части хлорнокислого калия. Оба порошка тщательно перемешиваются. Количество порошка, применяемого для вспышки, зависит от следующих условий: 1) от расстояния снимаемого об'екта от об'ектива (от масштаба снимка); 2) от применения тех или иных рассеивающих свет рефлекторов; 3) от об'ема помещения, в котором происходит с'емка; 4) от окраски стен этого помещения.

Последнее обстоятельство играет очень существенную роль, так как характер отражаемого стенами с'емочного помещения света в значительной мере влияет на внешность снимка.

Само собой понятно, что цветной растровый снимок лучше всего выглядит при таком же самом свете, при котором он был заснят. Снимки на пластинках с цветным растром большей частью делаются при дневном свете. Если такие снимки рассматривать затем при каком-нибудь искусственном свете, то отдельные цвета изображения кажутся особенно искаженными. С помощью соот-

ветствующих светофильтров искусственный свет можно до известной степени приблизить к дневному, но к сожалению такие фильтры не всегда можно достать. Для того чтобы иметь возможность рассматривать цветные растровые снимки при различных источниках света, не прибегая к светофильтрам, пытались наносить слабые растворы красителей прямо на эмульсионный слой пластинки или наклеивать под эмульсионный слой соответствующе окрашенные желатиновые пленки. Этот метод соответствует способу, применяемому художниками, пишущими акварельными красками. Он заключается в покрывании краской целых участков рисунка и требует очень тщательной работы и в конечном счете не гарантирует особо хороших результатов.

Все чаще стало практиковаться приготовление стереоскопических снимков на пластинках с цветным растром. Для этого обычно пользуются пластинками 45 × 107 *мм*. Имеется много типов малых фотографических ручных стереокамер для указанного формата, об'ективы которых снабжены необходимым желтым фильтром, а самые камеры — специальными кассетами для пластинок с цветным растром. Малый формат дает небольшую стоимость такого снимка. При рассматривании стереоскопических цветных растровых снимков сквозь линзы стереоскопа растровая структура снимка не мешает; только блестящие участки и большие света снимка немного отливают. Такие стереоскопические цветные снимки производят очень хорошее впечатление; на снимке хорошо передаются даже очень небольшие цветные пятна оригинала.

Пластинка с цветным растром должна быть со стороны слоя защищена покровным стеклом, так же как в диапозитиве. Для получения ортоморфных стереоснимков нужно разрезать алмазом стереопластинку и поменять местами половинки снимка. Для того чтобы при разрезании и разламывании растровой пластинки не повредить растровый и эмульсионный слои, поступают следующим образом: острым ножом на слое делается два разреза вблизи срединной линии снимка и симметрично по отношению к ней, а затем алмазом проводится черта по средней линии, лежащей на слое между двумя упомянутыми разрезами.

Область, в которой цветная фотография может оказать большие услуги, — это м и к р о ф о т о г р а ф и я. При слабом увеличении цветные растровые снимки очень хороши и легко изготовляются. В тех случаях, когда требуется передать в увеличенном виде большие равномерно окрашенные поверхности при слабом увеличении, особенно удобна пластинка «Педжет» с цветным растром.

В большинстве случаев при микрофотографической с'емке зерно растра пластинки мешает, даже если оно мелко. Особенно это сказывается, когда снимки не прямо рассматриваются глазом, а проектируются. В подобных случаях рекомендуется пользоваться одним из способов трехцветной печати (например Зенгер-Шеферда); такие изображения имеют чисто фотографический характер и практически не имеют зерна.

Мы уже говорили, что по способу трехцветной печати Зенгер-Шеферда требуется изготовить т р и негатива; каждый из них

снимается с определенным фильтром, причем фильтр должен быть согласован с применяемым источником света. С этих негативов делают позитивы, которые соответственно окрашиваются и затем очень точно совмещаются (накладываются друг на друга).

Естественно, что точное совпадение совмещаемых изображений тем труднее, чем больше в них деталей, следовательно в микрофотографии это совпадение особенно трудно достижимо. Проблема, о которой сейчас идет речь, очень сложна, и подробный разбор ее выходит за пределы настоящей книги. Желающий делать цветные микрофотографические с'емки должен выбрать какой-нибудь надежный способ работы, сначала точно ознакомиться с наставлениями к работе по этому способу, проверить их на собственном опыте и, если требуется, соответственно видоизменить, причем все свои опыты и результаты их заносить в особый журнал. Тот, кто умеет делать черно-белые микрофотографические снимки, сможет преодолеть и трудности микрофотографической цветной фотографии.

Автор придерживается мнения, что для решения почти всех задач цветной микрофотографии ни один из способов двухцветной фотографии не подходит, хотя для других целей они и применяются довольно удачно; одним из таких способов является например способ кодахром, предложенный фирмой «Истмен-Кодак».

Такого рода способ основан на следующем. Две панхроматические пластинки последовательно освещаются одна под красным, другая под зеленым фильтром; окраска светофильтра должна быть согласована с сортом пластинок и характером источника света. Так как предполагается, что снимаемый об'ект находится в покое и освещение остается постоянным, то проведение двух следующих одно за другим освещений не представляет никаких трудностей. Пластинки проявляются, фиксируются, промываются и сушатся. С этих негативов на тонкой целлюлоидной пленке делаются дубликаты негативов, которые отбеливаются, фиксируются, промываются и сушатся; после этой операции изображения становятся почти невидимыми. Отбеленный негатив от красного фильтра окрашивается в растворе зеленой краски, а отбеленный негатив от зеленого фильтра — в растворе красной, после чего оба негатива совмещаются и монтируются между покровными стеклами. Подлинные негативы заменяются дубликатами на целлюлоидной пленке по той причине, что гораздо легче совместить изображения на тонкой пленке, чем на сравнительно толстых стеклянных пластинках (оптическое действие стеклянных пластинок). Хорошее совмещение изображений имеет в этом способе существенное значение. Данными замечаниями мы и ограничимся в отношении этого интересного и практически очень полезного способа, успешно применяемого с различными видоизменениями.

Джон Гершель приблизительно в 1825 г. установил следующее: если с определенной скоростью вращать монету около одного из ее диаметров, то можно одновременно видеть обе стороны

монеты. Фиттон следующим образом повторил этот опыт: на одной стороне картона он нарисовал клетку, а на другой птичку. Затем картон приводился во вращение (путем скручивания между пальцев нитей, укрепленных в двух противоположных точках картона), и наблюдателю казалось, что птичка сидит в клетке. В 1882 г. Е. Мейбридж продемонстрировал в Лондоне некоторое подобие «живой фотографии». Фотографические снимки для этой демонстрации сделаны были им следующим образом. На равном расстоянии друг от друга было установлено в ряд несколько фотографических аппаратов. Затворы этих аппаратов последовательно один за другим приводились в действие двигавшимися перед ними людьми или животными. Изображения отдельных фаз этого движения с помощью прибора, устроенного наподобие «живого колеса», последовательно проектировались на одно и то же место проекционного экрана и оставляли таким образом, в глазу наблюдателя впечатление непрерывного движения заснятого об'екта.

Это впечатление возникало как результат инерции зрительного впечатления — явления, установленного еще Гершелем в его описанном выше несложном опыте.

Со времени введения в практику длинных, гибких, целлюлоидных лент в качестве подложки для светочувствительного слоя (1888 г.) огромное число исследователей занималось получением фазовых снимков с длительно совершающихся движений (с короткими промежутками между отдельными снимками). Благодаря трудам Бирт Акреса, В. Фриз-Грейена, Томаса Эдисона и бр. А. и Л. Люмьер, а также и других, в 1895 г. уже удалось осуществить кинематографическую с'емку и демонстрацию картин.

Вполне понятно, что осведомленность о методе Айвса совместного проектирования цветных изображений привела ряд исследователей к мысли делать по тому же принципу и киноснимки. Первые опыты получения вместо одного трех кинокадров, а именно: одного под красным, другого под зеленым и третьего под синим фильтром не увенчались успехом, так как по отношению к бывшим тогда в употреблении эмульсиям синие лучи по своей фотографической актиничности значительно превосходили зеленые и красные лучи; получавшиеся таким путем снимки были неудовлетворительны, краски их были тусклы и размыты.

В настоящее время этот недостаток легко устраняется при пользовании этим способом, но до сего времени сохранилась необходимость утроенной против обычно принятой скорости движения ленты как при с'емке, так и при проектировании. Последнее сопряжено с трудностями по следующим причинам: 1) время освещения отдельных кадров должно быть сокращено; 2) необходимо утроенное по сравнению с обычным количеством пленки; 3) механическая прочность киноленты вследствие большей быстроты разматывания должна быть больше обычной.

Спустя почти столетие после того, как Гершель сделал упомянутое наблюдение над вращающейся монетой, удались зас'емка и демонстрирование цветной киноленты, причем полученные результаты оставляли желать лучшего.

X. Урбан и Г. А. Смитт изобрели способ двухцветной кинематографии, известный под названием **кинемаколора**. Они применили вращающийся светофильтровой диск с четырьмя отверстиями, из которых два (противолежащие) не закрыты фильтрами. Из остающихся двух отверстий одно закрыто желтым (желатиновым) фильтром, пропускающим часть синих лучей, второе же отверстие покрыто красным фильтром, середина которого покрыта зеленым фильтром. Соответствующим подбором размеров этого наложенного куска зеленого фильтра красный ослабляется настолько, что при вращении диска с фильтрами на проекционном экране получается впечатление почти белого света. Без наложенного на красный фильтр куска зеленого фильтра получающийся на проекционном экране смешанный цвет имеет красноватый оттенок.

При с'емке (равно как и при проектировании) по 16 кадров в секунду при пользовании этим способом кинолента должна продвигаться со скоростью, вдвое больше обычной, так как здесь в секунду должно пройти 16 **пар** кадров. Получаемые с этих негативов позитивы представляют черно-белые снимки. На проекционном экране изображения получаются цветными потому, что они проектируются сквозь те же светофильтры, под которыми они были засняты.

При с'емке («экспозиции») негативный кадр под красным фильтром образуется под действием только красных лучей. Более или менее зачерненные участки негатива, полученные под красным фильтром, в позитиве получаются более или менее прозрачными. Когда такой позитивный кадр появляется в конце проекционного аппарата, перед ним стоит красный сектор вращающегося диска светофильтров, и на экране проектируются красные участки позитивного кадра (или оригинала). За красным кадром следует зеленый (позитив за зеленым фильтром). Два различно окрашенные и быстро следующие один за другим проектируемые изображения вызывают у зрителя впечатление снимка, сделанного в соответствующих смешанных цветах.

Мы уже имели случай отметить, что повышенная быстрота продвижения киноленты, необходимая и в способе «кинемаколор», может быть связана с значительными трудностями. Помимо этого описанный способ страдает целым рядом несовершенств: так например в изображении появляются цветные полосы, особенно в темных местах снимка; наряду с тем, что некоторые нежные и слабые цвета оригинала совсем не передаются, другие цвета кажутся непропорционально сильными. Если же учесть все «за» и «против» различных предложенных до настоящего способа цветной кинематографии, то **кинемаколор** можно считать **лучшим** из существующих в данный момент способов, хотя надо заметить, что имеются и другие способы, подающие надежды.

Среди многочисленных относящихся сюда методов следует особенно отметить новый способ, предложенный В. Дорн-Келлеем. Полученный по этому способу кадр при рассматривании его в проходящем свете передает цвета об'екта. К достоинствам способа относятся следующие: полученная кинолента может демонстриро-

ваться посредством обыкновенного кинопроекционного аппарата, скорость киноленты нормальная и при проектировании нет никакой надобности в светофильтрах. Результаты, полученные по этому способу, оказались довольно удовлетворительными.

Способ Келлея (имеется несколько вариантов) довольно сложен и его никак нельзя признать легко выполнимым. Этот способ трудно описать, не входя в большие подробности, для которых здесь нет места. Читателю, интересующемуся более подробными сведениями, укажем на соответствующие статьи в Brit. Journ. of Phot. 71, 1924; Col. Phot. Suppl, 18, p. 3. Если читатель усвоил разобранные выше понятия цветной фотографии, он легко поймет цитируемые статьи (этот способ изложен также в описании к англ. патенту № 205941 от 1922 г.).

Представляет также интерес способ цветной фотографии, разработанный Р. Бертоном с использованием липпмановских «пластырных пластинок». Этот способ видоизменен Келлер-Дорианом. (См. по этому вопросу Brit. Journ. of Phot., 70, 1923; Col. Phot. Suppl., 17, p. 10, а также Phot. Korr., 65, 1929, №№ 1—3; там описан способ кодаколор фирмы Истмен-Кодак.)

Заканчивая, мы должны сказать, что можно вполне надеяться на то, что в недалеком будущем мы будем располагать способом цветной фотографии, приемлемым во всех отношениях, с помощью которого смогут быть воспроизводимы в красках фотографическим путем все имеющиеся перед нами об'екты и при всяких условиях.

Мы здесь совершенно не касаемся практически неприемлемого, но теоретически очень интересного способа цветной фотографии по методу выцветания. По этому вопросу отсылаем к книге F. Limmer, Die Ausbleichvertahren, Halle a. S. J; 1911, в которой можно найти почти все интересующее по этому вопросу.

## Литература

B. Donath, Die Grundlagen der Farbenphotographie, Sammlung: Die Wissenschaft, Heft 14, Braunschweig 1906.

Alcide Ducos du Hauron, La Triplice Photographique des couleurs et l'Imprimerie, Paris 1897.

E. König, Die Farbenphotographie, Berlin 1921.

E. Valenta, Die Photographie in natürlichen Farben, Halle, a. S. 1912.

E. J. Wall, History of Three Color Photography, Boston, U. S. A. 1925.

Последний названный труд является основным по цветной фотографии.

II ГЛАВА

# ФОТОГРАФИЯ В РЕПРОДУКЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

ВИЛЬЯМ ХИСЛОП

## Основные понятия о видах печати

Репродукционная техника является одной из самых обширных областей применения фотографии. Не только репродукция рисунков в печати (иллюстрация), но даже воспроизведение шрифтов вязью и узорчатых виньеток и пр., в таком виде, как они часто встречаются в настоящее время, особенно в рекламах, было бы невозможно, если бы в репродукционной технике мы не могли бы прибегнуть к услугам фотографии. Современная репродукционная техника своим огромным развитием обязана фотографии.

В области репродукционной техники с помощью фотографии можно добиться следующего:

1. Можно с предельной быстротой изготовлять печатные формы для печати с штриховых рисунков; такие репродукции отличаются особой точностью (резкостью).
2. Фотографическим путем можно приготовлять клише для автотипии, т. е. печатные формы для высокой печати, с помощью которых фотомеханическим путем возможна передача полутонов, (переходов яркости).
3. С помощью трех (или четырех) взаимно соответствующих печатных форм, т. е. трех (или четырех) различно окрашенных клише, можно воспроизвести в красках цветной об'ект.

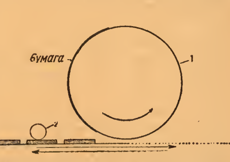
Для более глубокого понимания всех названных применений фотографии в репродукционной технике ниже мы излагаем принципы высокой, плоской и глубокой печати. Приведенные обозначения способа печати исходят из того, как относительно корпуса печатной формы расположена поверхность рисунка, т. е. та часть печатной формы, на которую наносится краска и которая соприкасается с оттиском. Разницу между названными способами хорошо поясняет рис. 183.

Краска
Металл.
2
Краска
Литографский камень или цинк
3
Краска
Медь

183. Схематическое изображение различных способов печати: *1*—высокая печать, *2*—плоская печать, *3*—глубокая печать

Наиболее часто употребляемым способом является *высокая печать*. Типографская (литерная) печать есть характерный пример высокой печати и один из видов ее первого применения.

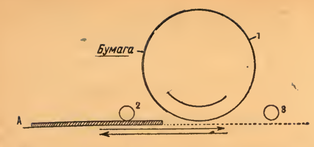
Поверхность рисунка, т. е. часть печатной формы, соприкасающаяся с оттиском, в о з в ы ш е н а и свободно выдается над углубленным основанием. Части машины, с помощью которых происходит нанесение краски (вальцы, тампоны и т. д.), наносят краску только на выступающую поверхность рисунка (рис. 183, *1*). Отсюда при печатании происходит перенесение краски на объект для печати (рис. 184).




184. Схематическое изображенне высокой печати: *А*—печатная форма, *1*—рулон бумаги для печати, *2*—валик для нанесения краски на печатную форму

Печатные формы в высокой печати следующие: деревянное клише (ксилография), цинковое (штриховое) клише, автотипное клише, гальвано. Гальвано — это точные копии с высоких печатных форм, приготовленные гальванопластическим путем (иногда с глубоких печатных форм) и включающие кроме того литерную печать (гальвано с литерной печати называются с т е р е о т и п и я м и). Раньше для иллюстрирования книг применялись исключительно деревянные клише, в настоящее время преимущественно пользуются клише, полученным фотографическим путем — штриховым т р а в л е н и е м н а ц и н к е или же а в т о т и п и е й, реже ксилографией, в которой перенос оригинала происходит фотографическим путем прямо на дерево; первые из названных (фотомеханические) способов дешевле, точнее и быстрее осуществимы.

*Плоская печать* (рис. 183, *2*) производится с плоских или цилиндрических поверхностей, на которых покрытые краской (печатающие) и непокрытые (непечатающие) участки лежат в одной плоскости или во всяком случае не отличаются заметной разностью уровней. Способ нанесения краски тот же, что и в высокой (типографской) печати, но в плоской печати он основан на том, что отдельные участки печатной формы могут воспринимать краску, а другие не могут. Вначале в качестве печатной формы пользовались поверхностью мелко зернистого и довольно пори-



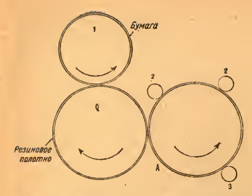

185. Схематическое изображение способа плоской печати: *А*—плоская печатная форма, *1*—рулон бумаги для печати, *2*—валик для насечения краски, *3*—валик для увлажнения печатной формы

стого известняка, на которой делался рисунок жирными веществами; после нанесения рисунка жирной печатной краской можно было получать оттиски, так как жирные места (рисунок) формы принимали краску, а участки грунта оставались белыми, конечно при условии, что до накрашивания рисунка камень увлажнялся водой или водным раствором гуммиарабика.

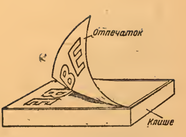
Отдельные места камня принимают жирную окраску, так как при увлажнении они остаются сухими, другие не принимают краски, так как они стали влажными. Другими словами, жирные места камня не принимают влаги и потому остаются сухими, места, не покрытые жиром, жадно впитывают влагу и потому становятся влажными. Ввиду того, что вначале формы для плоской печати делались на камне, способ плоской печати называется литографией. Этот способ изобретен в 1798 г. А. Зенефельдером. Для печатных форм в плоской печати могут употребляться только вещества, достаточно пористые и обладающие физическими свойствами, одинаковыми со свойствами литографского камня. В качестве замены литографского камня пользуются также металлами, а именно цинком или алюминием, поверхность которых сделана зерненой и обладающей способностью удерживать влагу. Наносимая на печатную форму краска переносится на материал для печати или непосредственно, как в плоской печати (рис. 185), или же сперва на гладкое эластичное резиновое полотно (рис. 186), а с него уже на бумагу. В последнем случае можно брать бумагу с более грубой (шероховатой) поверхностью без ущерба для качества печати. Способ, при котором используется промежуточная печать на резиновом полотне, называется офсетной печатью.

*Фототипия* — тоже способ плоской печати, дающий чрезвычайно красивые результаты; он настолько отличается от литографии, что мы посвящаем ему особое описание (см. ниже).

Способ *глубокой печати* является противоположностью упомянутому выше способу высокой печати: в глубокой печати углубления печатной формы заполнены краской, а поверхность формы остается чистой (рис. 183, *3*). Изображение в глубокой печати состоит из небольших возвышений краски, заполняющих углубления печатной формы; так как эти углубления имеют разную глубину, то и заполняющие их возвышения краски имеют разную высоту (толщину) и кажутся поэтому более или менее темными. По этой причине оттиски глубокой печати получаются более мягкими (бархатными) и более сочными,




**186.** Схематическое изображение так называемой офсетной печати: *А*—печатная форма; *2*—окрашивающие валики, *3*—увлажняющий валик, *О*—валик с натянутым резиновым полотном, *1* — рулон с бумагой для печати

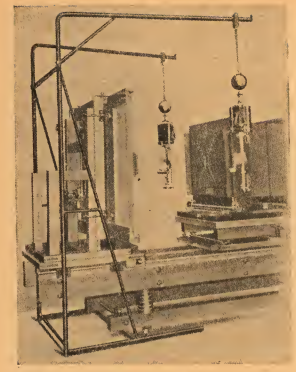



**187.** Пояснение взаимного расположения печатной формы и оттиска с нее

чем оттиски других видов печати. Характерными видами глубокой печати являются гравюры на стали и меди, офорты и меццотинто, а также гравюры с меловых рисунков. Способы глубокой печати, в которых используется фотография, следующие: гелиогравюра (фотогравюра), ротационная и быстрая глубокая печать (К. Клитш).

Высокая и плоская печать сходны между собой в том отношении, что в обеих на поверхность оттиска переносятся слои краски равномерной толщины. В глубокой печати дело обстоит иным образом: здесь толщина участков краски (красочных возвышений), переносимых на бумагу, различна.

Во всех трех способах печати с помощью фотографии производятся две различные операции: 1) приготовление соответствующего годного негатива (позитива), 2) копирование этого негатива (позитива) на печатную форму (фотографическим путем). Опыты, имевшие целью замену обеих названных операций только одной, не дали пока настолько хороших результатов, чтобы можно было о них говорить с практической точки зрения. Негативы для высокой и для плоской печати приготовляются конечно аналогичным образом. К этому надо добавить следующее: в способах печати, в которых оттиск делается с печатной формы непосредственно, необходим обратный негатив, т. е. негатив, в котором левая сторона изображения находится направо, и наоборот. В тех же способах, в которых имеет место перенесение рисунка на посредствующий слой, как например в офсетпечати, или способе печати с обращением для фотолитографии, нужен нормальный негатив. Сказанное пояснено на рис. 187. «Обращение» негатива происходит или м е х а н и ч е с к и, т. е. путем «снятия» содержащего изображение слоя со стекла и «обращения» слоя, или же о п т и ч е с к и, при с'емке, т. е. путем установки перед об'ективом обращающей призмы или обращающего зеркала, или же путем включения такого прибора на пути лучей позади об'ек-



**188.** Репродукционная камера Фальц и Вернера (Лейпциг) вместе с установкой для подвешивания дуговых ламп. Лампам можно придавать любое положение

тива. Отражающая поверхность зеркала наклонена к оси об'ектива под углом в 45°.

### Репродукционная камера

Для репродукционных снимков требуется прочно построенная репродукционная камера, монтированная (так чтобы были невозможны никакие сотрясения) на штативе, по которому она может передвигаться вверх и вниз, вперед и назад и ось которого перпендикулярна к поверхности доски для укрепления воспроизводимого оригинала. Репродукционные камеры должны быть снабжены целым рядом особых приспособлений, в детали которых за недостатком места входить на будем (рис. 188). Об'ектив репродукционной камеры должен быть очень хорошо исправлен. Особенно важно, чтобы даваемое об'ективом изображение было резко до самого края поля изображения, чтобы поле изображения было плоским и чтобы вторичный спектр был устранен. Относительное отверстие об'ектива может быть невелико. Фокусное расстояние применяемого об'ектива должно быть не меньше длины диагонали используемого формата пластинки. С увеличением фокусного расстояни об'ектива и при сохранении определенного масштаба уменьшения растет растяжение камеры. Если фокусное расстояние об'ектива короткое, то в целях достижения определенного увеличения об'ектив должен быть довольно значительно придвинут к оригиналу, что не очень желательно, принимая во внимание источники света (дуговые лампы), установленные перед оригиналом в целях освещения. Различают два типа воспроизводимых оригиналов: 1) штриховые рисунки, т. е. черные (или цветные) линии на белом фоне, 2) полутоновые оригиналы (фотограммы и т. д.), состоящие из непрерывных переходов светотени (полутона, серые тона) от самого белого до глубокого черного. Мы увидим, что репродукция оригиналов пер-

вого типа довольно проста, так как для нее требуется только воспринимающая краску печатная форма, возможно точнее отвечающая оригиналу (точка в точку и линия в линию).

Для получения негативов для штриховых репродукций пользуются одним из ходовых сортов сухих пластинок для штриховой репродукции (т. е. репродукционными пластинками); проявляют их в медленном проявителе, например в гидрохинонном с едким натрием. Этот проявитель дает прозрачные и достаточно плотные негативы, не нуждающиеся в усилении. Можно рекомендовать непродолжительную обработку такого негатива в фармеровском ослабителе, так как при этом исчезает легкая вуаль на краях линий и прозрачных местах негатива. Иногда после ослабления требуется снова усилить негатив. При репродукции штриховых рисунков должно быть принято во внимание следующее (хотя это в такой же мере относится и вообще к снимкам с резко выраженными деталями): надо позаботиться о том, чтобы свет, пройдя светочувствительный слой, не отразился от задней поверхности пластинки и не попал таким образом вторично в слой. Это неприятное обстоятельство можно исключить тем, что на заднюю поверхность пластинки наносится слой, поглощающий свет, или же пользуются пластинками, имеющими промежуточный слой между светочувствительным слоем и стеклянной пластинкой: для репродукционной сʼемки пользуются только так называемыми «противоореольными» сухими пластинками.

Для штриховой репродукции больше всего подходит *мокрый коллодион*, и потому он чаще всего и употребляется с этой целью. Стеклянные пластинки покрываются раствором коллодия, серебрятся, освещаются в мокром виде и проявляются в железном проявителе (с добавкой серной кислоты). После проявления пластинки усиливаются. Полученные таким путем негативы состоят из сильно почерневших и из прозрачных, как стекло, участков. Помимо того, что такие негативы очень удобны для наших целей, приготовление их обходится сравнительно дешево. Кроме того удобно, что коллодием легко покрывать также и пластинки большого формата и слой его после проявления очень легко снимается.

Ввиду того что мокрый коллодионный способ применяется только в репродукционной технике (штриховая и полутоновая — автотипная — репродукция), даем краткое описание его.

*Мокрый коллодионный способ.* Коллодий — это раствор пироксилина в смеси эфира и этилового спирта. Пироксилин — это хлопок, сначала обработанный концентрированной азотной и серной кислотой, а затем основательно промытый и высушенный. Если раствор коллодия полить на стеклянную пластинку, то растворители быстро испаряются и на пластинке остается слой, который постепенно застывает в желатинообразную массу. Если надлежащим образом освободить слой от последних следов воды и спирта, он становится роговидным и водонепроницаемым. При дальнейших операциях коллодий служит только в качестве носителя светочувствительных солей серебра. К коллодионному раствору добавляются иодиды, а именно, обычно иоди-

стый кадмий, иодистый аммоний, иодистый стронций, а также в небольших количествах бромиды (бромистый аммоний) и хлориды. Упомянутые добавки делаются в виде спиртовых растворов (с небольшим количеством воды). Перед обливанием коллодионным раствором стеклянные пластинки, большей частью зеркального стекла, сначала очищаются в азотной кислоте, а затем тщательно промываются в проточной воде. Надо следить, чтобы на пластинках не оставалось отпечатков пальцев: поверхность пластинки должна быть химически чистой.

Для лучшего приставания коллодионного слоя пластинка сначала поливается очень разбавленным желатиновым раствором, для чего употребляются твердые сорта желатины; желатиновому раствору дают стечь и пластинку сушат в месте, защищенном от пыли. Затем на покрытую желатиной стеклянную поверхность поливается коллодионный раствор, при этом пластинку держат в левой руке, поворачивая и наклоняя во все стороны таким образом, чтобы коллодий равномерно растекался по всей ее поверхности. Когда коллодионный слой застуденится, пластинку погружают в слабо подкисленный раствор азотнокислого серебра; здесь коллодионный слой, бывший до того прозрачным и бесцветным, становится опалесцирующим и приобретает густую желтоватую окраску вследствие образования иодистого серебра, играющего в дальнейшем роль светочувствительного вещества. Раствору азотнокислого серебра дают стечь, насухо вытирают обратную сторону пластинки, закладывают пластинку в кассету (для мокрых коллодионных пластинок существуют специальные кассеты), кассету вставляют в камеру и производят экспозицию.

Чувствительность мокрых коллодионных пластинок мала и простирается только на синий, фиолетовый и ультрафиолетовый. По этой причине такие пластинки можно сенсибилизировать (серебрить) и проявлять при довольно ярком желтом свете. Для освещения снимаемого об'екта предпочтительнее пользоваться светом дуговых ламп, излучение которых богато фиолетовыми и ультрафиолетовыми лучами. При пользовании названным источником света требуется сравнительно короткое время освещения даже при сильном диафрагмировании об'ектива.

Проявление изображения на мокрой коллодионной пластинке — физическое: в иодистом серебре коллодионного слоя образуется скрытое изображение, и проявитель, состоящий из железного купороса, медного купороса, уксусной кислоты и воды, восстанавливает только то серебро, которое находится у поверхности слоя. Восстанавливающееся серебро удерживается коллодионным слоем и осаждается в тех местах слоя, на которые подействовал свет.

Проявление пластинки происходит следующим образом: пластинку держат в левой руке и быстро поливают ее другой рукой таким количеством проявляющего раствора, чтобы она была полностью покрыта им. Обычно проявление заканчивается быстро. Во время проявления пластинку качают во все стороны, затем промывают.

Так как иодистое серебро не растворимо в обычном растворе гипосульфита, негатив фиксируется в растворе цианистого калия, затем промывается и усиливается. Усиление может быть произведено различными способами. Негатив или сначала отбеливают в растворе азотнокислого свинца и красной кровяной соли, отмывают и чернят в растворе сернистого натра или же поступают следующим образом: негатив отбеливается в растворе медного купороса и бромистого калия, ополаскивается и чернится в растворе азотнокислого серебра; иногда приходится усилить чернение купанием в растворе сернистого натра. Описанные способы усиления (при умеренной промывке) могут быть здесь применены, так как в мокрой коллодионной пластинке изображение лежит близко к поверхности слоя. Негативы на коллодионных пластинках потому так непрозрачны, что частицы серебра, из которых построено изображение, фактически находятся в контакте друг с другом, в то время как в желатине обыкновенной сухой пластинки они суспендированы каждая в отдельности (желатина — прозрачная среда).

Копии с таких негативов делаются по способу с хромированным белком; такие копии содержат рельефное изображение; оно противостоит действию растворов для травления и обладает способностью набирать в себя жирные краски. На металлическую пластинку сначала поливается разбавленный раствор белка или животного клея, а поверх него — раствор двухромовокислого аммония. После этого начинают покачивать пластинку и высушивают ее при невысокой температуре. При копировании надо следить за тем, чтобы негатив все время плотно прилегал к металлической пластинке. По окончании копирования отпечаток покрывается очень тонким слоем краски и затем кладется в водяную баню (в качестве краски можно взять например краску для воска или сургуча или же типографскую краску). Вода проникает в хромированный белковый слой и растворяет его в тех местах, где он остался незатронутым светом, т. е. незадубленным. Путем осторожного трения ватным тампоном растворимые участки хромированного белкового слоя легко удаляются, и остается только изображение в виде задубленного, слегка окрашенного рельефа из хромированной желатины на чистой металлической подложке, например цинке. Затем рельефное изображение запыляется мелко раздробленным асфальтом, который прилипает к окрашенным выступающим местам и легко стирается с мест, где проступает чистый металл. При легком нагревании металлической пластинки нанесенная вначале краска соединяется с порошком асфальта, образуя коричневый слой, защищающий поверхность изображения от действия травящих веществ.

Если приготовленная таким путем печатная пластинка предназначается для плоской печати, то на короткое время ее кладут в разбавленный водный раствор фосфорной кислоты. В этом растворе рельеф изображения освобождается от жиров. Если теперь смазать пластинку раствором гуммиарабика, высушить и обмыть водой, то остается только воспринимающее жирную краску изображение и «основание», отталкивающее ее, что мы и требуем

от плоской печатной формы. Каждая машина для плоской печати независимо от того, назначена ли она для прямого печатания или для офсетпечати, имеет два рода вальцов, а именно вальцы, поддерживающие во влажном состоянии печатающую пластинку (поверхность), и вальцы, подводящие к изображению (печатающей поверхности) краску. В плоской печати применяются также и алюминиевые пластинки. «Травление» их происходит особым образом.

При изготовлении географических карт пользуются почти исключительно плоской печатью. Особо важное значение приобретают здесь так называемые фотолитографские способы.

Для репродукции подлинников карт пользуются большими, очень тщательно сконструированными репродукционными камерами.

В дополнение к описанному способу плоской печати с помощью цинковых пластинок следует заметить, что окрашенное изображение не непосредственно соприкасается с поверхностью металлической пластинки, а лежит на задубленном белковом слое, который с течением времени может легко сойти.

## Вандейкова печать

Очень часто применяемым репродукционным методом является вандейкова печать, которая чаще всего используется при изготовлении географических карт. По этому способу совсем не делают негатива, а в качестве оригинала берут позитивное изображение, и с него описываемым ниже способом, не пользуясь камерой, приготовляют на литографском камне или цинковой пластинке позитивное же изображение. Бумага, на которой нарисован или отпечатан оригинал, должна быть очень тонкой, иметь очень гладкую поверхность; рисунок (или отпечаток) должен быть сделан только с одной стороны бумаги и должен быть чисто выполнен; краска должна быть черной. Зерненная (матированная) металлическая пластинка покрывается по описанному выше способу светочувствительным слоем. В данном способе вместо хромированного белкового слоя берут слой хромированного рыбьего клея, более толстый, чем белковый слой. В тех местах, где подействует свет, слой твердеет и становится нерастворимым в воде. Бумага с подлинником рисунка накладывается на покрытую эмульсией пластинку и освещается (копируется). На пластинке при этом образуется негативное изображение оригинала.

После экспозиции пластинка промывается и слегка протирается ватным тампоном; теперь участки, соответствующие черным местам оригинала, свободны от слоя рыбьего клея, а на участках, соответствующих белым местам оригинала, слой рыбьего клея сохранен. Затем после купания в разбавленной кислоте слой этот делается губчатым и мягким. После того как пластинка высохнет, в ее поверхность валиком втирается сухая типографская краска или же она обливается полужидким раствором типографской краски и асфальта, которому затем дают стечь; таким образом на пластинке остается очень тонкий слой краски. Типографская краска пристает к тем участкам матированной пластинки, ко-

торые не покрыты слоем рыбьего клея, и удалить краску можно только полировкой поверхности пластинки. Таким образом участки пластинки, не покрытые рыбьим клеем соответственно отвечающим им местам оригинала, остаются черными. Теперь удаляется окрашенный слой рыбьего клея; с этой целью пластинку кладут в воду и точно так же, как и в способе хромированным белком, осторожно протирают ватным тампоном. Размягчение и удаление окрашенного слоя рыбьего клея облегчается при купании пластинки в слабощелочной или слабокислой ванне (состав которой зависит от химического состава примененной краски).

## Цинковое травление

Если нужно изготовить печатную форму для высокой печати, то негатив копируется, как описано выше, на довольно толстую цинковую пластинку, и участки пластинки, не закрытые слоем хромированного белка, травятся в разбавленном растворе азотной кислоты. Очень важно, чтобы действие травящей жидкости распространялось только в глубину. Поэтому нужно позаботиться о том, чтобы оно не распространялось в стороны до того, как оно не пошло достаточно вглубь. Предложено много способов преодоления этого вредного обстоятельства. Ниже мы постараемся кратко изложить принцип, положенный в основу этих методов.

После того как пластинка слегка протравлена, ее сушат и запыляют порошком драконовой крови (смола, добываемая из листьев малайской пальмы) таким образом, чтобы смолой были покрыты только поверхность и боковые части рельефа изображения, но не свободные участки цинка. Если теперь нагреть пластинку, смола расплавится и образует блестящий покров поверх слоя. Преимущество пользования драконовой кровью заключается в том, что эта смола дает исключительной крепости слой и не так легко плавится, как другие смолы. После обработки драконовой кровью пластинка снова подвергается травлению. Запыление драконовой кровью с последующим травлением повторяется до тех пор, пока не будет достигнута требуемая глубина травления. После всего этого пластинку хорошо очищают и иногда в отдельных местах углубляют с помощью механических вспомогательных средств. И наконец пластинка монтируется на колодке из твердого дерева для придания ей типовой высоты.

Можно делать печатные формы для высокой печати также путем прямой отливки или же гальванопластическим путем. Способы, основанные на свойстве неосвещенной желатины набухать в воде, применяются следующим образом. Толстый слой хромированной желатины экспонируется под негативом воспроизводимого рисунка и затем промывается. Неосвещенные места желатины в воде набухают и образуют рельеф. При желании непосредственно получить отливку используют получившийся от набухания рельеф; если же оттиск нужно получить гальванопластическим путем, то набухшая желатина соответствующим способом удаляется.

## Техническая передача в печати светотени

Как в высокой, так и в плоской печати полутона (светотень) — черные и цветные — можно передать только в том случае, если покрытую краской печатающую поверхность разбить на линии или точки различной ширины и величины. Между напечатанными линиями и точками будет проглядывать бумага. Резчики по дереву прибегают уже издавна к этому приему, но у них удачность воспроизведения переходов яркости (полутонов) зависит от искусности самого работника.

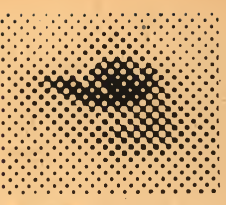
Удалось выработать два основных способа, позволяющих с помощью фотографии осуществить техническую передачу в печати полутонов. Эти способы следующие: автотипия и фототипия. А в т о т и п и я — это фотографический метод разложения печатающей поверхности на точки, а ф о т о т и п и я основана на особом принципе, который будет разобран в отделе фототипии.

*Автотипия (полутоновой способ).* Автотипия — это фотографический способ, с помощью которого полутоновые участки (переходы светотени) рисунков карандашом или углем, акварелей, фотограмм и т. д. превращаются в группы черных точек различной величины с белыми промежутками (тоже различной величины). Основа этого способа о п т и ч е с к а я. Для него необходим так называемый р а с т р, т. е. решетка или сетка, состоящая из прозрачных и непрозрачных линий или точек, помещаемая при с'емке воспроизводимого оригинала перед светочувствительной пластинкой. Растр обычно состоит из двух стеклянных пластинок, на каждой из которых нанесен ряд более или менее тонких линий так, что одинаковой ширины прозрачные и непрозрачные линии последовательно сменяют друг друга. Линии одной пластинки пересекают линии второй пластинки под углом в 90°. Такие, так называемые крестообразные, растры выглядят как тонкий тюль, зажатый между стеклянными пластинками. Имеются крестообразные растры (32 и более 78 линий на 1 *см*); выбор растра для каждой репродукции определяется количеством деталей в воспроизводимом оригинале, а также характером бумаги для печати.

Для растровых снимков требуется очень тщательно сконструированная репродукционная камера с приспособлением для установки растра на определенном расстоянии от светочувствительного слоя. Растр должен стоять строго параллельно к плоскости пластинки, расстояние его от светочувствительного слоя зависит от тонкости растра, растяжения камеры и примененной диафрагмы.

При наводке камеры на какую-нибудь равномерно освещенную белую поверхность получаются точки практически почти одинакового размера. Размер точки конечно в числе прочего зависит также от продолжительности освещения. При очень коротком освещении получаются очень тонкие, нежные точки; с удлинением времени освещения возрастает и величина точки. Если вместо равномерно освещенной белой поверхности навести об'ектив на любой оригинал, например какую-нибудь акварель или фотограмму, то при тех же условиях, что и при наводке на белую по-

верхность, получатся автотипные точки разной величины, так как яркость просвета диафрагмы в разных направлениях различна, т. е. соответствует яркости частей оригинала, лежащих в этих направлениях (рис. 189). Участкам больших светов оригинала соответствуют большие, а теням оригинала — очень мелкие, нежные автотипные точки.



**189.** Увеличение с небольшого участка автотипной репродукции

Автотипные негативы исполняются на пластинках с мокрым коллодионом или с коллодионной эмульсией. Эти негативы всегда нуждаются в усилении. Для автотипных репродукций годятся и мелкозернистые сухие желатиновые пластинки; такие пластинки проявляются в быстро и контрастно работающем проявителе (метолгидрохинон с едким натром или метолгидрохинон — поташный проявитель). Негативы на таких пластинках усиливать необязательно. Автотипией главным образом пользуются в высокой печати. Автотипный негатив можно копировать на металл совершенно так же, как и штриховой негатив. В целях приготовления клише для высокой печати автотипный негатив способом, описанным выше, копируют на слой рыбьего клея, содержащего двухромовокислый аммоний (с сравнительно высоким содержанием рыбьего клея), а затем поступают следующим образом. Медная пластинка (для автотипных клише идут главным образом медные пластинки) непосредственно после копировки под негативом поступает в чашку с окрашенной водой; в качестве красителей служат растворимые в воде анилиновые краски: чаще всего анилинвиолет, эозинрот или метиленвиолет. Хромированный слой рыбьего клея в этой ванне окрашивается; случайно оказавшийся избыток краски можно удалить, промывая пластинку. Затем на пластинку пускают ток воды и ускоряют начинающееся проявление, приливая теплую воду и слегка протирая ватным тампоном. После проявления пластинка высушивается. Когда этот процесс закончен, пластинку помещают над пламенем и равномерно и довольно сильно нагревают. По мере нагревания («отжигания») слой все более твердеет и темнеет и становится наконец шоколадно-коричневым и подобным эмали. Прогретый таким образом слой обладает большой стойкостью к действию как разбавленной азотной кислоты, применяемой для травления цинковых пластинок, так и раствора хлорного железа, употребляемого для травления медных пластинок.

Оригиналы, особо хорошо подходящие для автотипной репродукции, можно иногда безукоризненно воспроизвести почти «механически», но, как правило, в зависимости от характера воспроизводимого оригинала обычно в той или иной мере требуется

ретушь (дополнительное травление) клише; результат этой дополнительной обработки зависит от личного умения травильщика.

Травление автотипного клише представляет довольно кропотливую работу, требующую много внимания и в основном состоящую из тех же манипуляций, что и травление штрихового клише. Для травления — но не для тонкого травления — часто пользуются травильными машинами, среди которых можно назвать следующие типы: травильная машина М. Люиса, машина А. Холмштрэма, травильный скребок Е. Альберта. Описание рабочего процесса при травлении можно найти в учебниках по репродукционной технике, приведенных в литературном указателе.

Растровые негативы и позитивы применяются также в способе плоской печати.

## Фототипия

Другим фотографическим способом технической передачи в печати полутонов является фототипия. Поверхность толстой зеркальной стеклянной пластинки сперва покрывается смесью, состоящей из пива, калийного жидкого стекла и едкого натра. Облитые этой смесью пластинки после просушки промываются в холодной воде. При этом пиво вымывается, и на пластинке остается плотно сидящий мелкозернистый слой, назначением которого является служить подложкой для слоя хромированной желатины. Подготовленная таким образом пластинка покрывается слоем желатины с бихроматом калия и затем быстро высушивается в особых ящиках («печах») при умеренной и равномерной температуре (50—60 °С). Освещенные места такого слоя становятся твердыми и в таком состоянии не набухают в воде. После освещения хромированной желатины под обыкновенным фотографическим негативом (с непрерывными переходами светотени) ее кладут в чашку с водой. Так как слой стремится расшириться только по направлению вверх, он покрывается мелкозернистой сетью мелких морщинок; при этом в тенях изображения «зерно» выражено сильнее, а в светах оно тоньше и нежнее. Затем пластинку кладут в водяную баню, к которой добавлены раствор аммиака и глицерин; в этой ванне образование морщинок усиливается. Теперь слой состоит, с одной стороны, из задубленных, сухих и, с другой — из влажных, набухших частей, причем в различных местах он сморщен по-разному. Наносимая краска пристает к сухим, задубленным частям и не пристает к влажным, набухшим. Таким путем получается оттиск с задубленных частей слоя. Зерно слоя неравномерно и большей частью так мелко, что невооруженным глазом его нельзя заметить; в то же время его можно перенести на литографский камень или цинковую пластинку.

Фототипия дает необыкновенно красивые изображения, но не годится для массового выпуска, так как слой хромированной желатины обыкновенно не выдерживает больше 1 000 оттисков. Фототипией охотно пользуются для печати художественных видовых открыток и для иллюстрирования научных трудов.

## Гелиогравюра (фотогравюра)

Самый художественный вид глубокой печати — это гелиогравюра. Первоначально пластинки для гелиогравюры покрывали краской от руки, вытирали и затем делали отпечаток на бумаге, т. е. обращались с ними совершенно так же, как с гравюрами из меди или стали. В настоящее время изображение приготовляется на медном валике (цилиндре) и все операции, как то: нанесение краски, протирание, печатание, происходят при помощи механических приспособлений.

Пластинка для гелиогравюры содержит вытравленное в глубину изображение, причем глубина травления отдельных частей изображения пропорциональна глубине соответственных полутонов оригинала. Причина того, что травление происходит именно таким образом, заключается в том, что травящая жидкость тем легче проникает сквозь нанесенное на медную пластинку негативное изображение, чем тоньше слой желатины в этих местах, отвечающих более или менее темным местам оригинала. Процесс травления начинается прежде всего в самым тонких местах пигментного изображения, отвечающих наиболее темным местам оригинала, затем постепенно переходит на другие и в конце концов доходит до самых толстых мест пигментного слоя, соответствующих самым светлым местам оригинала. Когда процесс травления зашел уже настолько далеко, его прерывают.

Протравленная таким образом пластинка еще не годна для печати, так как при стирании с поверхности пластинки нанесенной печатной краски одновременно была бы увлечена и краска с участков полутонов и глубоких теней. Поэтому для того, чтобы краска задерживалась при вытирании пластинки, изображение каким-то образом должно иметь зерненую структуру. Когда гелиогравюра печаталась еще на ручном станке, требуемое зерно получалось следующим образом. Хорошо отполированную пластинку клали в так называемый «ящик для запыления», т. е. высокий ящик с вставленным внизу пропеллером. На дно ящика насыпалось небольшое количество очень мелкого порошка асфальта, который распылялся по ящику приведенным во вращение пропеллером. Медная пластинка оставалась в ящике до тех пор, пока не покрывалась тонким равномерным слоем асфальтовой пыли; этот слой («зерно») расплавлялся путем нагревания пластинки. На препарированную таким способом металлическую пластинку переносится негативное пигментное изображение (т. е. рельеф хромированного желатинового слоя, у которого тени углублены, а света возвышаются).

Для машинной ротационной и скоропечатной глубокой печати (по К. Клитшу) описанное зерно слишком мелко; в этих случаях на пигментное изображение впечатывается так называемый растр глубокой печати (сетка светлых линий на темном фоне), и рисунок, покрытый таким «чуждым изображению» растром, переносится на полированный медный цилиндр. В качестве травящего вещества применяется концентрированный раствор хлорного железа.

Для накрашивания пользуются не слишком клейкой краской, т. е. состоящей из пигмента и легко подвижной жидкости. Медный цилиндр, содержащий растровое пигментное изображение, обильно покрывается краской. Избыток ее удаляется с помощью тонкого гибкого стального ножа, так называемого ракеля, после чего к поверхности печатного цилиндра плотно прижимается бумага для оттиска. С такого медного цилиндра можно сделать очень много отпечатков, несмотря на то, что краска снимается ножом из закаленной стали. Об'ясняется это обстоятельство тем, что ракель снимает не всю краску до конца и что на пигментном изображении остается очень тонкий слой краски, выполняющий до известной степени роль смазки. Так как этот слой чрезвычайно тонкий, он очень быстро высыхает: он бывает сухим уже перед тем, как бумага приходит в соприкосновение с цилиндром. Бумага берет на себя краску только из углублений изображения. Автотипное изображение высокой печати состоит из точек различной величины и одинаковой плотности (черноты), а растровое изображение в глубокой печати состоит из точек приблизительно одной величины, но разной плотности (черноты). Травленая глубокая печатная форма выглядит как пластинка, вырезанная из сот, ячейки которой очень малы и имеют разную глубину.

На печатной форме для глубокой печати невозможно так называемое тонкое травление (принятое в высоких печатных формах). На эту печатную форму можно действовать только различной концентрацией растворов хлорного железа, которые, пройдя слой пигментного изображения, в'едаются в медный цилиндр с различной скоростью и на различную глубину. Чем концентрированнее раствор хлорного железа, тем дольше и труднее проникает он сквозь пигментный слой, чем слабее раствор — тем легче. Все чисто фотографические недостатки, имеющиеся во взятом за основу негативе или позитиве, все виды последующей обработки негатива или позитива должны быть исправлены и закончены до приготовления пигментного изображения.

## Трехцветная печать

Очень важной областью применения фотографии в репродукционной технике является трех или четырехцветная печать, т. е. техническое печатное воспроизведение цветных оригиналов. Ни один из существующих чисто фотографических способов получения цветных репродукций не оказался годным для массового выпуска совершенно одинаково выглядящих цветных отпечатков.

Принципиально трехцветная печать основана на трехцветной теории Максвелла.

Пучок лучей белого света, проходя через стеклянную призму, разлагается и дает сплошной спектр. Этот опыт повидимому доказывает, что белый свет состоит из различно окрашенных лучей с разной длиной волны и разной степенью преломляемости. Если выходящий из призмы пучок лучей направить на большой

об'ектив зрительной трубы, то все цветные лучи вновь соединятся и дадут белый свет. Поместим перед об'ективом зрительной трубы экран с тремя отверстиями переменной ширины, через которые можно пропустить большую или меньшую часть красного, зеленого или синего участков спектра; соединив эти доли спектральных участков, получаем следующее: величина этих трех отверстий может быть отрегулирована таким образом, что в фокальной плоскости зрительной трубы образуется белое изображение. Этот белый свет суб'ективно не отличим от белого, получаемого от совместного действия всех лучей спектра. Если совершенно закрыть отверстие в синем спектральном участке, то совместное действие красных и зеленых лучей даст желтый свет.

На таких и аналогичных им опытах построена теория цветового восприятия Юнга—Гельмгольца и отчасти теория трехцветной печати. Делается следующее допущение: цветовые ощущения основаны на трех, независимо друг от друга протекающих физиологических процессах; каждый из них вызывается определенной группой длин волн, причем имеет место определенное перекрывание одних групп длин волн — другими.

Когда все три «основных ощущения» одинаково сильно возбуждены, мы получаем впечатление белого. Если основные ощущения возбуждены с одинаковой силой и достаточно интенсивно, то мы не в состоянии различить, было ли общее ощущение результатом действия сплошного спектра или же только его трех отдельных частей. Если возбуждается только по одному из названных основных ощущений, мы получаем впечатление красного (а именно кошенильно-красного) или зеленого (смарагд) или синего (именно сине-фиолетового). Когда возбуждается два основных ощущения, получаются впечатления приблизительно тех цветов, которые живописец называет «основными цветами». Эти цвета можно назвать «дополнительными» цветами, исходя из следующих оснований: если сумму этих двух ощущений мы добавим к третьему (недостающему) ощущению, мы получим ощущение белого, или, выражаясь иначе и для наших целей понятнее, цвет, получающийся в результате суммы двух основных ощущений, равен белому минус тот цвет, ощущения которого нехватает. В нашем описанном выше опыте с призмой и спроектированным ею спектром мы обнаружили следующее: если закроем отверстие, пропускающее синие лучи (см. выше), то останутся красные и зеленые лучи, которые, вместе взятые, дают впечатление желтого; такой желтый цвет мы называем также «минус синий», так как он образуется при исключении из общего спектра синих лучей.

В нижепомещенной таблице сопоставлены различные смешанные цвета (стр. 426).

Путем соответствующего изменения интенсивности трех отдельных раздражений (возбуждений) можно вызвать любое цветовое ощущение. Надо помнить, что в основу приведенной таблицы положено а д д и т и в н о е смешение цветов, т. е. смешивание окрашенного с в е т а, а не смеси различно окрашенных пигмен-

| Возбуждаемое цветовое ощущение | Ощущаемый цвет | Соответствующий дополнительный цвет | Возбуждаемое цветовое ощущение |
|---|---|---|---|
| Красный, зеленый, фиолетовый | белый | черный | никакого |
| Красный сам по себе | красный (шарлах) | сине-зеленый | зеленый, фиолетовый |
| Зеленый „ „ „ | зеленый (смарагд) | розовый | красный, фиолетовый |
| Фиолетовый сам по себе | фиолетовый | желтый | красный зеленый, |
| Красный, зеленый | желтый | фиолетовый | фиолетовый |
| Красный, фиолетовый | розовый | зеленый | зеленый |
| Желтый, фиолетовый | сине-зеленый | красный | красный |
| ½ красного, ½ желтого, ½ фиолетового | серый | серый | ½ красн., ½ желт., ½ фиолетового |
| ½ красного, ½ желтого | коричневый | фиолетовый (бледный) | фиолетовый, ½ красного, ½ зеленого |

тов или растворов красителей (субтрактивное смешение цветов).

Дж. Максвелл утверждал следующее: пользуясь тремя цветными прозрачными серединами, так называемыми фильтрами, из коих каждый пропускает только одну длину волн, вызывающую только одно из основных цветовых ощущений, и фотографической пластинкой, чувствительной ко всем лучам спектра, три основные цветовые ощущения, вызываемые цветным об'ектом, можно передать в виде трех черно-белых изображений. С помощью полученных черно-белых изображений двумя различными способами можно создать цветное изображение, соответствующее по окраске оригиналу.

Эти два различные метода известны под названием аддитивного и субтрактивного. Эти названия основаны на том, что по одному из этих способов цветное изображение получается в результате оптического проектирования одного на другое (сложения, аддитивности) трехцветных изображений (от просвечиваемых цветных фотографических диапозитивов), в то время как по другому, субтрактивному, методу упомянутые три изображения в трех различных цветах наносятся друг на друга на белой подложке.

Конечно в печати может быть использован только субтрактивный трехцветный способ. Принцип, лежащий в основе этого способа, становится легко понятным, если ясно представить себе следующее: когда мы фотографируем простой черно-белый рисунок, то свету, отраженному от белых мест оригинала в негативе, отвечает черный осадок серебра, а черные места оригинала, не отражающие падающего на них света, в негативе обозначены прозрачными местами.

Если мы хотим передать оригинал печатным путем на белой бумаге, нам нужно позаботиться о том, чтобы уничтожить отражательную способность белой бумаги в тех местах, которые от-

вечают черным местам оригинала. Это достигается следующим путем: приготовляется печатная пластинка, в которой прозрачным местам негатива, его, так сказать, отрицательным участкам, отвечают места, способные воспринимать краску; мы подбираем такую краску, которая отнимает у белой бумаги способность отражать свет. Цвет такой краски мы можем назвать «белым с знаком минус», т. е. черным.

Теперь то же рассуждение перенесем на наши три цветные извлечения (составляющие негативы). В негативе, снятом под синим фильтром, прозрачны те его части, которые соответствуют частям оригинала, совершенно не отражавшим синего света; впоследствии с этих мест при печатании на бумагу будет перенесена краска. Краска, которая будет для этого применена, должна отнять у бумаги способность отражать синий свет, но зато она должна отражать зеленый и красный; поэтому печатная краска должна быть «белой минус синяя», т. е. желтой. Путем аналогичного рассуждения приходим к следующему: печатная краска для красного негатива должна быть «минус красная», т. е. сине-зеленой, а печатная краска для зеленого негатива должна быть «минус зеленая», т. е. бледнорозовой.

Сначала делается оттиск с клише, соответствующего негативу, снятому под синим фильтром. Отпечаток делается желтой краской на бумаге для художественной печати. Поверх него, т. е. поверх желтого изображения, печатают бледнорозовой краской с клише от негатива, снятого под зеленым фильтром. И в заключение поверх желтого и розового изображения делается оттиск сине-зеленой краской с клише от негатива, снятого под красным фильтром. Все три изображения должны в точности покрыть друг друга, т. е. соответственные места клише должны в точности совпадать друг с другом.

Наличие в настоящее время панхроматических желатиновых сухих пластинок является причиной значительного упрощения современного способа трехцветной печати; с помощью надлежащим образом сенсибилизированных коллодионных эмульсий тоже можно хорошо и легко получить необходимые три клише.

В практике трехцветной печати приходится проделывать следующие важные операции: 1) приготовление трех негативов путем фотографирования воспроизводимого оригинала под тремя соответствующими светофильтрами; 2) приготовление автотипных репродукций с упомянутых негативов (при репродукции плоских об'ектов операции 1 и 2 об'единяются в одну); 3) приготовление трех клише; 4) соответствующую корректуру соотношений яркости (тонов) в клише путем тонкого травления; 5) с трех клише в соответствующих красках делаются три оттиска — один на другой.

1. Приготовление негативов происходит следующим образом. Свет, идущий от об'екта, до того как он достигнет светочувствительную пластинку, заставляют пройти сквозь помещенный до или после об'ектива с'емочного аппарата светофильтр, поглощающий определенные группы длин волн. Каждый фильтр про-



190. Кювета-фильтр

пускает приблизительно одну треть всего спектра, причем эти спектральные области частично перекрывают друг друга. При суб'ективном рассматривании эти три фильтра кажутся: красным, зеленым и синим. Действительно окраска фильтров приблизительно (ни в коем случае не точно) соответствует основным цветам юнг-гельмгольцовой теории цветового восприятия. Так как фильтры приходится приспособлять к цветочувствительности применяемых фотографических пластинок (которая может быть различна в зависимости от происхождения пластинки), то цвета фильтров иногда могут при суб'ективном их рассматривании довольно сильно отличаться от упомянутых основных цветов.

Светофильтры бывают или жидкие, это — растворы красителей, налитые в кюветы (стеклянные ванны) с плоскопараллельными стенками (рис. 190) или сухие, желатиновые. Последние представляют собой окрашенные желатиновые пленки, заключенные между плоскопараллельными покровными стеклами. Фильтры последнего рода являются в настоящее время наиболее употребительными.

2. Если об'ект плоский или очень мало простирается в глубину, то без особых затруднений операции 1-ю и 2-ю можно об'единить в одну, а именно: с'емку об'екта можно произвести сразу при посредстве крестообразного растра. При наличии неплоских об'ектов сначала изготовляются три нормальные полутоновые негатива, с них делаются позитивы, а с позитивов — автотипная репродукция (т. е. с использованием крестообразного растра при с'емке). При этом при с'емке каждого составляющего негатива крестообразный растр должен поворачиваться на 30° относительно своего положения при с'емке предыдущего негатива, иначе при окончательном печатании изображений (одно поверх другого) получается ясно выраженный и очень вредящий изображению «муар».

3. В основном клише изготовляются совершенно так же, как было описано в автотипии (автотипией можно пользоваться как в высокой, так и в плоской печати); только приемы тонкого травления в трехцветной печати несколько отличаются от приемов, применяемых к простому черно-белому изображению.

4. Так как травлением можно изменить не только глубину промежутков между точками, но и величину самих автотипных точек, то травильщик может так вести этот процесс, что окончательное изображение (сумма всех трех оттисков) будет безукоризненно передавать оригинал.

5. Огромное значение для впечатления, производимого цветным изображением, имеет правильный подбор печатных красок.

В плоской литографской печати никогда нельзя добиться такой правильной передачи цветов, как это возможно в высокой печати, что об'ясняется невозможностью в литографской печати травления, которое было бы приспособлено к характеру изображения.

Печатные краски должны удовлетворять ряду условий, а именно, они должны быть: 1) прозрачны, 2) светоустойчивы и 3) так составлены, чтобы они поглощали те именно лучи, которые пропускаются соответствующими фильтрами и потому могут действовать на соответствующие негативы.

Оказалось, что печатные краски не могут обладать одновременно всеми требуемыми качествами и что поэтому необходимы известные компромиссы. Помимо того, что печатные краски не могут полностью удовлетворять поставленным требованиям,— цветная передача цветных оригиналов иногда усложняется по причинам, зависящим от сорта применяемых пластинок, от светофильтров и т. д. Для получения безукоризненной передачи в трехцветной печати требуется очень большой навык, так как при работе существует очень много источников ошибок. Печатные краски, отвечающие поставленным требованиям в отношении цвета, должны были бы быть: желтая для клише с негатива, снятого под сине-фиолетовым фильтром; красная с бледноголубым оттенком для клише с негатива, снятого под зеленым фильтром; зеленовато-синяя для клише с негатива, снятого под красным фильтром. На практике же получить желтую краску, которая удовлетворяла бы выставленным выше требованиям, можно легко, но вместо бледнокрасной (розовой) приходится брать темнокрасную, почти шарлах; применяемая на практике синяя имеет не зеленый, а пурпуровый оттенок. Работают обычно с фильтрами, отвечающими теоретически требуемым печатным краскам, а получающиеся клише приспособляют путем тонкого травления к имеющимся печатным краскам.

*Яркость* (процентное содержание черного) имеющихся в продаже печатных красок для трехцветной печати очень сильно колеблется, и надо сказать, что до сих пор ничего не сделано для их стандартизации. Ясно конечно, что одни и те же краски не годятся для передачи и темного и яркого об'екта и что чем больше (в отношении насыщенности и яркости) примененные краски приближаются к требованиям теории, тем внимательнее приходится быть при печатании.

Получение чисточерного или серого в результате взаимного наложения трех светящихся прозрачных красок является очень трудной задачей. Подбор строго взаимно соответствующих сортов красок, что совершенно необходимо для достижения указанной цели, требует чрезвычайно большой тщательности и навыка. По этой причине иногда прибегают к *четвертой* печатной краске, а именно — к темносерой, усиливающей темные тона изображения. Клише, с которого делают оттиск этой краской, приготовляется с негатива, снимаемого обычно под строгожелтым фильтром. Четвертая печатная пластинка обычно служит для придания особого совершенства цветной печати. Пользование ею есть дело «искусства», научного обоснования для нее привести нельзя.

Целый ряд светлых красок, как например смарагд-зеленая, некоторые оттенки пурпуровой и фиолетовой, не удается безошибочно передать субстрактивным смешением обычных печатных

красок. Другое затруднение заключается в том, что при автотипной репродукции цветные «точки» изображения окружены белым фоном бумаги, в результате чего возникает нежелательный контраст. Так например синее небо выглядит серым, а красные точки теряют в яркости. Только желтый цвет, несмотря на белое окружение, не ослабляется; желтый обладает сам по себе такой яркостью, что контраст не ослабляет его яркости.

При цветной репродукции с помощью офсетпечати, дающей очень красивые изображения, и более практичной по причине дешевизны и сравнительной простоты работы, а также вследствие возможности получения больших выпусков, указанные выше трудности в смысле правильного подбора красок преодолеваются тем, что в офсетпечати кроме трех оттисков в основных цветах делаются еще и бледнорозовый и голубой. Этим приемом красный и синий разлагаются каждый на две составные части и таким образом как бы «преломляются».

С чисто теоретической точки зрения глубокая печать должна была бы быть тоже очень пригодной для цветной репродукции. В глубокой печати отпадает упомянутый выше нежелательный контраст между цветными точками изображения и окружающим их белым фоном, так как здесь более светлые тона передаются чрезвычайно тонкими, практически сплошными слоями краски, а более темные тона — значительно более толстыми слоями краски. Однако в цветной глубокой печати затруднен процесс совмещения отдельных оттисков и их тонкая ретушь: несмотря на это цветная глубокая печать должна в недалеком будущем получить очень большое распространение.

## Литература


K. H. Broum, Lehrbuch der Chemigraphie, 2. Aufl., W. Knapp, Halle a. S.

J. M. Eder, Ausf. Handbuch der Photographie, Bd. 2, Teil 4 und Bd.4, Teil 3; W. Knapp, Halle a. S.

E. Goldberg, Die Grundlгgen der Reproduktionstechnik, 2 Aufl. (Enzyklop. d. Photographie, Heft 80), W. Knapp, Halle a. S., 1923.

C. Kampmann-E. Goldberg, Die graphishen Künste, 4. Aufl. (Sammlung Göschen Nr. 75). Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1927.

R. Russ, Handbuch der modernen Reproduktionstechnik, 2 Bd, 3. Aufl., Klicumsch & Co., Frankfurt a. M., 1927.

## СОДЕРЖАНИЕ

3 глава

## ТЕОРИЯ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С. Е. Шеппард



4 глава

## АСТРОФОТОГРАФИЯ

Чарльз Давидсон



5 глава

## ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАФИИ В ФИЗИКЕ

Г. Мусс

## 6 глава

## ФОТОГРАФИЯ В ЕТАЛЛУРГИИ

### Джон Генри Ж. Г. Монаппенни



## 7 глава

## МИКРОФОТОГРАФИЯ

### Георг Родмен

**8 глава**

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОГРАФИИ В ГЕОДЕЗИИ

**С. А. Уинтерботем**



**9 глава**

## АЭРОФОТОСЪЕМКА

**Ф. Лоус**

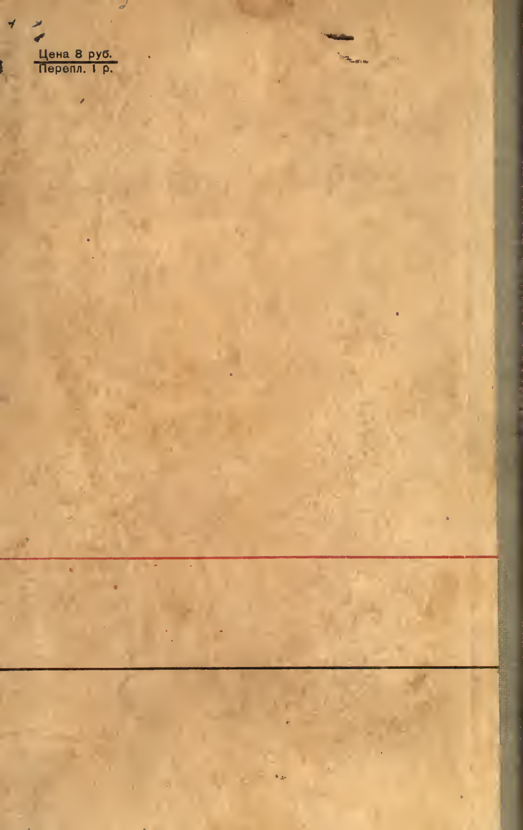
Гизлегпром № 926
Индекс 5/ф.
Тираж 3 175 экз.
Заказ 1072
Уполномоченный Главлита № В—77842
Сдано в набор 1/VII—1933 г.
Подписано к печати 7/V—1934 г.
Формат бумаги $62 \times 93/_{16}$
Количество печатн. листов $27^{1}/_{4}$
Количество печат. знаков в листе 48.500

## ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

### к книге „Фотография в науке и практике"

| Стр. | Строка | Напечатано | Следует читать |
|---|---|---|---|
| 13 | 24 сверху | $\frac{1}{u} \cdot \frac{1}{v} = \frac{1}{f}.$ | $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}.$ |
| 16 | 1 снизу | $\delta i$ | $i$ |
| 29 | 5 „ | $y = \frac{yM'_2 b'a}{a'b};$ | $y' = \frac{yM'_2 b'a}{a'b};$ |
| 37 | 8 сверху | $\frac{\operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} u'} = \frac{f' + x'f}{f + x_f}$ | $\frac{\operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} u'} = \frac{f' + x'_f}{f + x_f}$ |
| 74 | 17 снизу | $x = 1$ | $x = l$ |
| 74 | 15 „ | $I = \frac{1}{\kappa} \log \text{ nat } \frac{I}{I_l}$ | $l = \frac{1}{k} \log \text{ nat } \frac{I}{I_l}$ |
| 75 | 6 сверху | $\kappa' = \frac{\log \text{ nat } I - \log \text{ nat } I_l}{m}$ | $k' = \frac{\log \text{ nat } I - \log \text{ nat } I_l}{ml}$ |
| 85 | Рис. 37 | $Ag\ NO_2$ | $AgNO_3$ |
| 141 | Таблица | $\frac{dx}{dt} = kl\ (A - x)$ | $\frac{dx}{dt} = \kappa I(A - x)$ |
| 141 | „ | $D = Dm\ (l - e_{-k}\ It)$ | $D = Dm\ (1 - e^{-kIt})$ |
| 141 | „ | $\frac{dx}{dt} = \frac{l - R}{b}\ l(-e^{-kx} - e_{-ka}$ | $\frac{dx}{dt} = \frac{1 - R}{b}\ I\ (e^{-kx} - e^{-ka})$ |
| 141 | „ | $D = \gamma \log\ e\ [O - (O - l) e^{-bIt}$ | $D = \gamma \log_e [o - (o - 1) c^{-bIt}]$ |
| 142 | „ | $\frac{dx}{dt} = \kappa l\ (A - x)$ | $\frac{dx}{dt} = \kappa I\ (A - x)$ |
| 142 | „ | $D = Dm \left[ l - \frac{l}{n} \sum_{s=0}^{s=n-l} e^{-kr^s It} \right]$ | $D = Dm \left[ 1 - \frac{1}{n} \sum_{s=0}^{s=n-1} e^{-kr^s It} \right]$ |
| 152 | 5 сверху | $\gamma_n \cdot \gamma^d = 1.$ | $\gamma_n \cdot \gamma_p = 1.$ |
| 190 | 20 снизу | $\alpha = R\text{si} \sin P \odot \pi\alpha$ | $= R \sin PS \sin P \bigcirc \pi\alpha$ |
| 363 | 3 сверху | $dD = \frac{f}{l}, \alpha L 2$ | $dD = \frac{f}{l}\ dL$ |




Цена 8 руб.
Перепл. 1 р.